

LABORATÓRIO DE ELETRÔNICA

M.A.Garms

UNIP - 2014

(v140802)

Introdução

Esta Apostila tem como objetivo apresentar um conjunto base de experiências a serem desenvolvidas pelos alunos com o intuito de complementar o estudo nas seguintes Disciplinas (ministradas no curso de Engenharia Elétrica - Eletrônica dos Campus Alphaville e Marquês da Universidade Paulista UNIP): Eletrônica Básica (EB), Eletrônica (EL), Circuitos Eletrônicos (CE) e Eletrônica Aplicada (EA).

As experiências inicialmente propostas (em número de 34) foram agrupadas nos seguintes temas:

I. Diodos Semicondutores

Experiência I.1: Curva característica de um diodo semicondutor.....	6
Experiência I.2: Limitadores.....	8
Experiência I.3: Retificação de tensão elétrica alternada.....	11
Experiência I.4: Fonte de tensão com diodo zener.....	13

II. Transistores Bipolares de Junção (TBJ)

Experiência II.1: Chaveamento de LED por um TBJ.....	14
Experiência II.2: Polarização de um TBJ.....	16
Experiência II.3: Fonte de tensão com BJT e diodo zener.....	18
Experiência II.4: Fonte de corrente com BJT e diodo zener.....	19
Experiência II.5: Ganho de amplificador EC (com e sem RE).....	20
Experiência II.6: Impedâncias de entrada e de saída de amplificador EC.....	22
Experiência II.7: Resposta em frequência de amplificador EC.....	24
Experiência II.8: Amplificador em CC (seguidor de emissor).....	26
Experiência II.9: Estágio de saída em simetria complementar.....	28
Experiência II.10: Amplificador Diferencial.....	32
Experiência II.11: Amplificador Operacional Discreto.....	34

III. FET

Experiência III.1: Amplificador SC com JFET.....	36
Experiência III.2: Resposta em frequência de amplificador SC.....	38

IV. Medidas de parâmetros de um AO

Experiência IV.1: Tensão de compensação de entrada.....	40
Experiência IV.2: Correntes de polarização de entrada.....	41
Experiência IV.3: Impedância intrínseca de entrada.....	42
Experiência IV.4: Taxa de resposta (slew rate)	43
Experiência IV.5: Rejeição de modo comum (RRMC).....	44
Experiência IV.6: Produto ganho-largura de faixa (banda) GB.....	45
Experiência IV.7: Ajuste de off-set.....	47

V. Circuitos lineares com AO

Experiência V.1: Amplificador inversor.....	49
Experiência V.2: Amplificador não inversor.....	50
Experiência V.3: Amplificador Diferencial.....	51
Experiência V.4: Diferenciador e Integrador.....	53
Experiência V.5: Computação Analógica.....	55

VI. Circuitos não lineares com AO

Experiência VI.1: Smith Trigger/ Multivibrador Astável.....	57
Experiência VI.2: Retificação de precisão.....	58
Experiência VI.3: Astável com 555.....	59

VII. Osciladores e Filtros

Experiência VII.1: Oscilador por deslocamento de fase.....	61
Experiência VII.2: Filtro passa-baixas.....	62

Recomenda-se que, respeitando a disponibilidade de aulas, tais experiências sejam desenvolvidas em Laboratório muito embora elas também possam ser simuladas.

Procurou-se compatibilizar a complexidade destas experiências com a sua relevância no processo de aprendizagem considerando ainda a duração disponível para as aulas de Laboratório. Ao critério do professor pode-se ainda realizar mais de uma experiência num único dia.

Como princípio na elaboração desta Apostila, estabeleceu-se um “grau intermediário” na descrição das operações a serem realizadas no Laboratório bem como na descrição de como devem ser os Relatórios.

Entre outras observações, válidas na maioria das situações, podem-se citar:

- Os itens empregados foram os seguintes: Objetivos, Teoria, Circuito etc. Nenhum deles foi considerado obrigatório na descrição de uma dada experiência bem como o grau de detalhamento de um determinado item pode variar entre as diversas experiências.
- As medidas a serem efetuadas são estabelecidas ao longo do texto, embora freqüentemente não se discuta em detalhes sobre os instrumentos, geradores e outros dispositivos do ponto de vista de “como usar” (por exemplo, não se fixa o canal do osciloscópio ou a escala empregada) e de “onde usar” (expressões tipicamente empregadas: *meça a tensão de saída, meça a corrente no resistor de carga, fixe a frequência do sinal de entrada etc*).
- Nos circuitos não se definiram todos os nomes de grandezas e componentes.
- Teoria e cálculos são apenas indicados nas referências.
- Não se explicitaram formas de Tabelas, Gráficos e outros elementos que porventura possam ser construídos para apresentar resultados.

Apresenta-se no início da aula uma preleção geral sobre a experiência na qual se podem detalhar pontos ou orientações consideradas relevantes pelo professor. Contudo os alunos deverão discutir entre si (membros de um determinado grupo) e com o professor para determinar como proceder em caso de dúvida na execução da experiência (devido a detalhes não explícitos). Além disto, os alunos deverão estabelecer os objetivos e as conclusões de cada experiência bem como pesquisar a teoria nas referências ou em outras fontes.

Também deverão ser estimulados a desenvolver os seus próprios relatórios quanto à organização e à apresentação de resultados. No entanto os relatórios deverão ter um conteúdo mínimo o qual será composto por: objetivos, descrição, apresentação de resultados das medidas (Tabelas, Gráficos etc), cálculos teóricos, comparações entre valores previstos e medidos e conclusões.

Os trabalhos serão realizados por grupos de no máximo cinco alunos. Deverão ser montados em folhas A4 grampeadas sem capa dura ou espiral. A primeira folha deverá constar somente dos seguintes campos: curso, turma, campus, data, nome da experiência, número e nome dos alunos componentes do grupo. Tipicamente será entregue na aula seguinte à realização da experiência.

Como não foi definido um padrão de apresentação dos resultados observa-se que os trabalhos deverão ter um caráter exclusivo relativamente a cada grupo de alunos responsável por sua confecção. Pode ser feito à mão ou por meio de SW adequado tipo Excel, Word e outros, entretanto, os trabalhos de grupos diferentes que forem considerados demasiado semelhantes serão recusados.

Embora tenham sido feitas revisões, agradecemos a indicação de erros que eventualmente persistam.

Observações

- *Salvo descrito explicitamente a potência máxima dos resistores empregados deve ser de pelo menos 0.25W e a tensão de isolamento dos capacitores de pelo menos 30V.*
- *Em função da disponibilidade de componentes durante a execução de algumas experiências verificou-se ser necessário troca de valores. Pequenas variações não se mostraram críticas (exemplo: na experiência II.5 o resistor de 120 Ω trocado por 100 Ω). Caso isto seja necessário recomenda-se em geral que antes de sua aplicação em aula se teste a experiência com suas alterações.*
- *O atenuador resistivo de aproximadamente 1:10 (ver resistores de 1K Ω e 120 Ω na saída do gerador), o qual é montado diretamente no protoboard sendo utilizado nas experiências II.5 a II.7, permite impor um sinal maior do gerador e considerando que em geral o cabo deste não é blindado isto é conveniente para minorar os efeitos de ruído na entrada do amplificador. Nestas condições o sinal de entrada **ve** é considerado como sendo o sinal sobre o resistor de 120 Ω (esta condição é explicada aos alunos na preleção sobre a experiência II.5).*
- *Nas experiências com retificação filtragem e regulação de tensão (I.4, I.5, II.3 e II.4) procurou-se limitar a corrente na carga para valores menores que 0,25A de modo a não danificar o protoboard (corrente máxima típica em protoboards: de 1A a 3A).*
- *Uma previsão sobre quais experiências serão efetivamente realizadas em cada disciplina, de acordo com a carga horária atual, é a seguinte: EB: I.1, I.2, I.3, I.4, II.2 e II.1(eventual); EL: II.3, II.4, II.5, II.6, II.7 e II.8 (eventual); CE: III.1 e III.2 (eventuais); EA: V.1 e V.2 (mesma aula) e VI.1(eventual).*

- *Sobre a escala apresentada no item anterior não se condicionou de modo absoluto a execução de experiências à realização prévia de aulas teóricas correspondentes embora os assuntos de teoria e laboratório sigam “levemente” sincronizados. Por meio de preleções para cada experiência procura-se discuti-la o suficiente para que possa ser realizada com proveito pelos alunos, isto é, experiências podem ora auxiliar uma futura apresentação da teoria ou ora testar em laboratório um conhecimento teórico prévio.*
- *A escala prevista é informada ao responsável pelo Laboratório para providenciar o material e instrumental necessário para a realização das experiências.*
- *A última versão (com alterações e correções) desta apostila encontra-se disponível no site www.marcogarms.pro.br sendo que os alunos devem levar uma cópia da experiência prevista (ou acessa-la via internet) para a aula de Laboratório.*
- *Em Apêndice é apresentada uma experiência sobre computador analógico que pode ser simulada no MULTISIM (sua montagem é relativamente complexa para uma aula de Laboratório).*

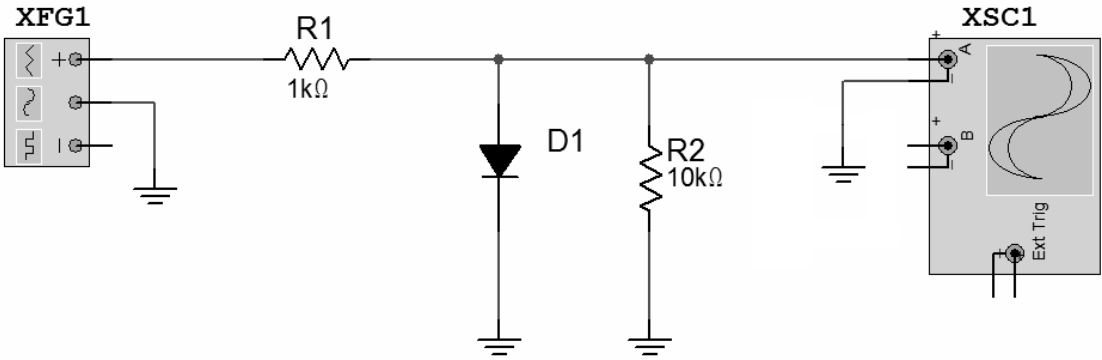
I. Diodos Semicondutores

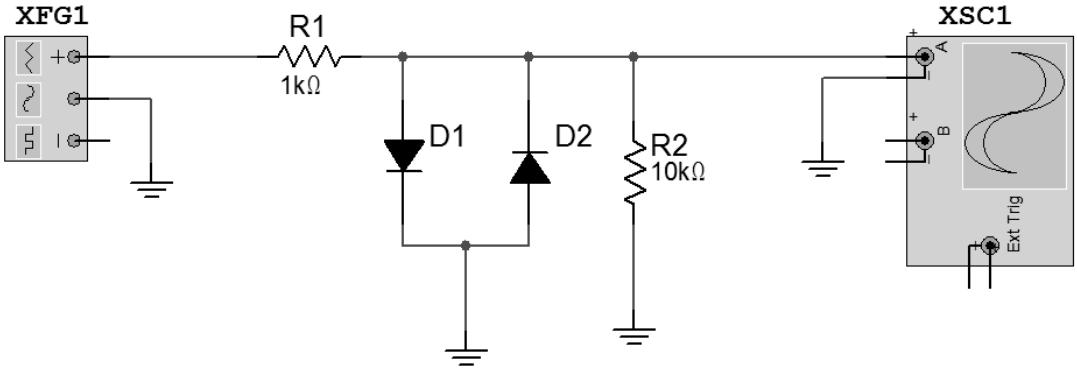
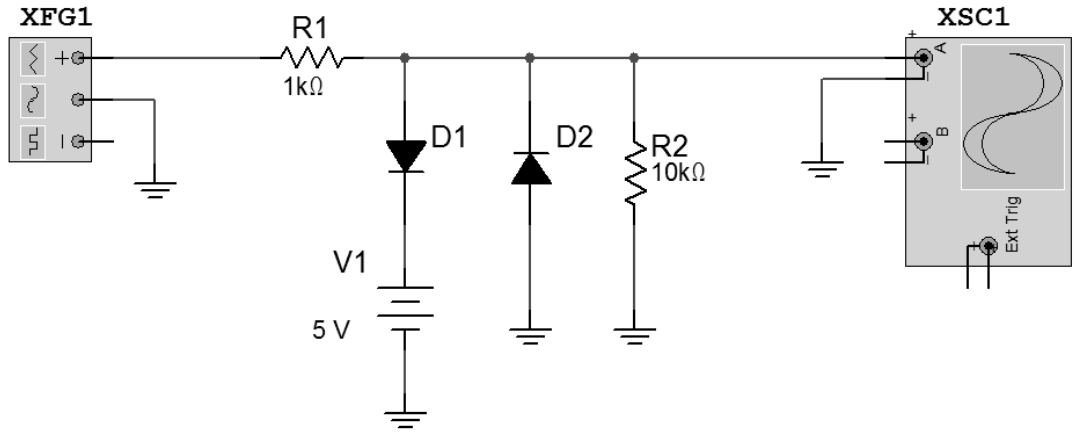
Experiência I.1: Curva característica de um diodo semicondutor.

1	Objetivo: Medir as tensões e correntes, num diodo semicondutor polarizado diretamente, como também reversamente, para obter a sua curva característica.
2	Teoria: Capítulo 1 (particularmente seção de 1.6) de [BOYLESTAD & NASHELSKY - 1996].
3	<p>Circuitos:</p> <p>(a)</p> <p>(b)</p> <p>(c)</p> <p>Multímetro Fonte DC ajustável (>12V) 2 x 1KΩ - 1/4W 100Ω - 1/4 W diodo de sinal.</p>
4	Monte o circuito (a) do item (3). Para cada valor de tensão de alimentação do seguinte conjunto {0, 3, 6, 9, 12, 15, 18, 30} [V], meça (adapte para usar apenas 1 multímetro) e anote, em tabela apropriada, a tensão e a corrente no diodo.
5	Inverta a polaridade da fonte de tensão. Para cada valor de tensão do seguinte conjunto { -5, -10, -15} [V], meça e anote, em tabela apropriada, a tensão e a corrente no diodo.

6	Com os valores obtidos nos itens (4) e (5), desenhe o gráfico correspondente à curva característica do diodo (I x V).
7	Estime os valores de corrente nos circuitos (b) e (c) do item (3), considerando a queda de tensão no diodo D1 igual a 0.6V.
8	Monte o circuito (b) do item (3) e meça a corrente no diodo.
9	Monte o circuito (c) do item (3) e meça a corrente no diodo.
10	Compare as estimativas feitas no item (7) com os resultados obtidos nos itens (8) e (9).

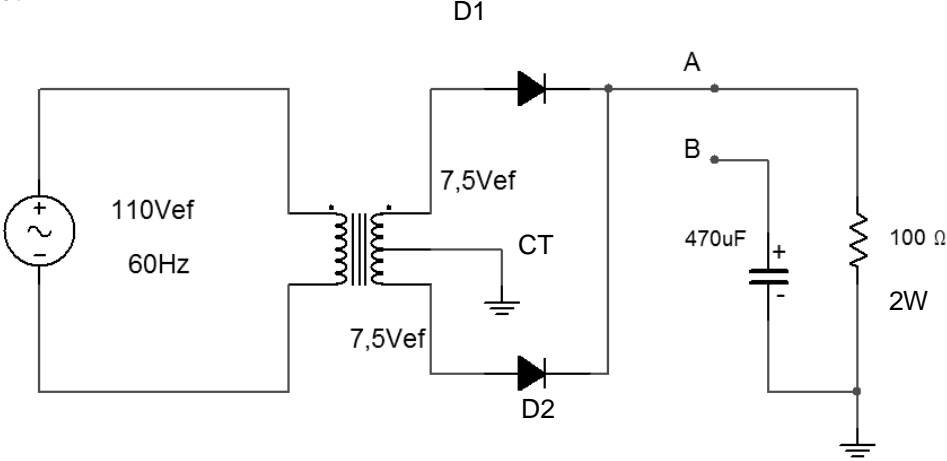
Experiência I.2: Limitadores.

1	Objetivo: Montar e testar circuitos limitadores típicos.
2	Teoria: Os circuitos limitadores são utilizados na entrada de circuitos para proteção contra tensões muito altas. Veja seção 2.9 de [BOYLESTAD & NASHELSKY - 1996].
3	 <p>Gerador de áudio Osciloscópio duplo feixe 1KΩ - 1/4 W 10KΩ - 1/4 W diodo de sinal.</p>
4	Ajuste o gerador de áudio para obter um sinal de entrada (sobre o resistor R1) senoidal de 1kHz @ 15Vp.
5	Monte o circuito do item (3). Obs.: R1 representa a impedância de saída do circuito excitador e R2 representa a impedância de entrada do circuito protegido.
6	Para o circuito obtido, calcule os valores teóricos das tensões de saída (sobre o resistor R2) de pico positivo e negativo.
7	Meça os valores de pico positivo e negativo na saída deste circuito e compare com os valores teóricos obtidos no item (4).
8	Inverta do diodo D1 do circuito do item (3) e repita os itens de (6) e (7) para este caso.

9	 <p>Gerador de áudio Osciloscópio $1\text{K}\Omega$ - 1/4 W $10\text{K}\Omega$ - 1/4 W 2 x diodo de sinal.</p>
10	<p>Monte o circuito do item (9) (basta “inserir adequadamente” mais um diodo no circuito do item (3)) e repita os itens de (6) e (7) para este caso.</p>
11	 <p>Gerador de áudio Osciloscópio duplo feixe Fonte DC ajustável $1\text{K}\Omega$ - 1/4 W $10\text{K}\Omega$ - 1/4 W 2 x diodo de sinal.</p>
12	<p>Monte o circuito do item (11) (basta “inserir” uma fonte de CC no circuito do item (9)) e repita os itens de (6) e (7) para este caso.</p>

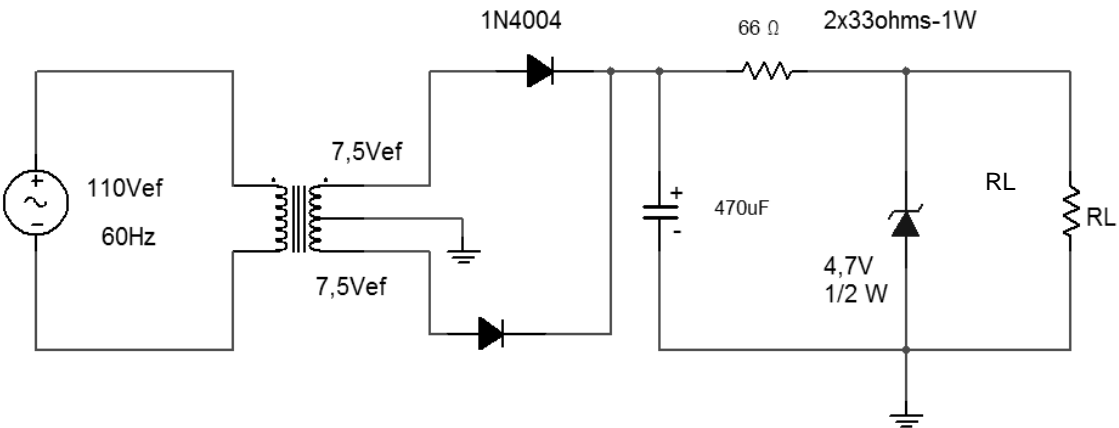
13	
14	<p>Explique a função do diodo na entrada A do circuito do item 13 (uma porta inversora TTL do CI 7406).</p>

Experiência I.3: Retificação de tensão elétrica alternada.

1	Objetivo: Obter tensão elétrica em corrente contínua a partir da tensão alternada da rede elétrica com a utilização de diodo semicondutor para retificação e de capacitor para redução de componente de tensão alternada na carga.
2	Teoria: Capítulo 3 (particularmente a seção 3.2) de [CIPELLI & MARKUS & SANDRINI - 2007].
3	<p>Circuito:</p>  <p>Osciloscópio duplo feixe Multímetro Transformador 110Vef x 7,5+7,5Vef / 0,5Aef 2 x diodo 1N4004 (ou equivalente) 470 μF – 20V 100 Ω - 2W.</p>
4	Monte o circuito apresentado no item (3) com o diodo D2 desconectado.
5	Meça a tensão de pico (osciloscópio) de cada um dos secundários e o “center-tap” - CT (derivação central) – V_{max} .
6	Meça a tensão DC de saída (V_L) com o voltímetro (multímetro).
7	Estime o valor da corrente na carga usando a expressão: $I_L = V_L / R_L$
8	Compare a medida de V_L (item 6) com as estimativas: $V_L = V_{max} / \pi$ e $V_L = (V_{max} - 0,7) / \pi$.
9	Registre (foto ou desenho) a forma de onda da tensão elétrica no resistor de carga R_L . Meça o valor de pico a pico do sinal AC em R_L (ΔV_L – “ripple”).
10	Conecte o diodo D2 e repita os itens (6), (7) e (9).
11	Compare a medida de V_L , obtida conforme a sequência (10), com as estimativas: $V_L = 2V_{max} / \pi$ e $V_L = 2(V_{max} - 0,7) / \pi$.

12	Insira um capacitor de $470\mu\text{F}$ em paralelo com o resistor R_L e repita os itens de (6), (7) e (9).
13	Compare os valores, relativos à V_L e à ΔV_L , medidos na sequencia (12) com os estimados usando a referência citada no item (2).

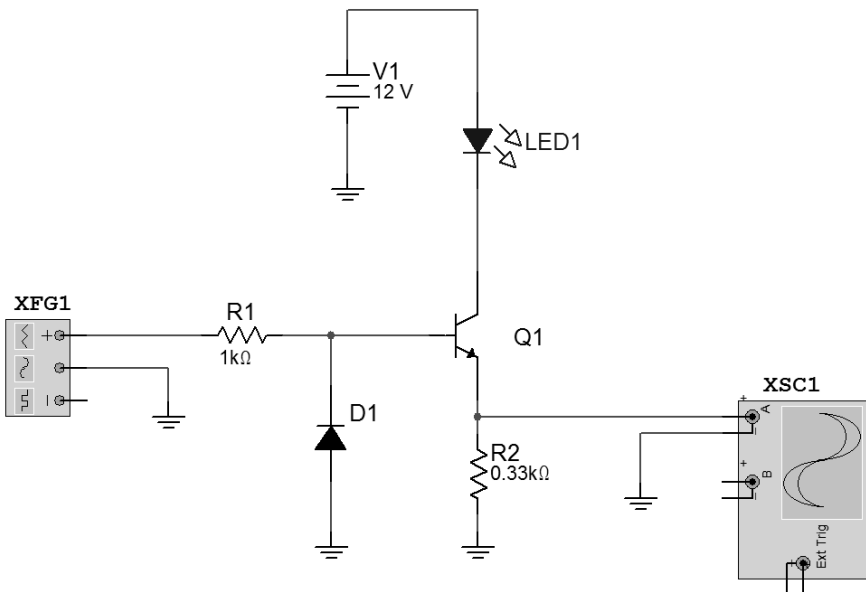
Experiência I.4: Fonte de tensão com diodo zener.

1	Objetivo: Construir uma fonte de tensão DC regulada com a utilização de diodo zener.
2	Teoria: Capítulo 5 (particularmente a seção 5.3) de [CIPELLI & MARKUS & SANDRINI - 2007].
3	<p>Circuito:</p>  <p>Osciloscópio duplo feixe Multímetro Transformador 110Vef x 7,5+7,5Vef / 0,5Aef 2 x diodo 1N4004 (ou equivalente) 470 μF – 20V 2 x 33Ω - 1W diodo zener 4,7V – 0,5W 3 x 100 Ω - 2W.</p>
4	Monte o circuito apresentado no item (3).
5	<p>Para as seguintes cargas (resistor R_L): {0, 50, 100, 200, 300, ∞} [Ω], meça as seguintes tensões no resistor de carga R_L:</p> <ul style="list-style-type: none"> • DC (VL) com multímetro e • AC (ΔV_L – “ripple”) em V_{pp} com osciloscópio. <p>Observações:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Valores de tensão AC, em V_{pp}, medidos por meio de osciloscópio (escala AC). 2. Registre (foto ou desenho) a forma de onda da tensão AC no resistor de carga R_L para cada caso. 3. Use três resistores de 100Ω @ 2W associados adequadamente para obter os diversos valores de R_L.
6	Usando a expressão $I_L = V_L / R_L$, calcule para todos os casos os valores da corrente DC na carga R_L .
7	Faça os gráficos de V_L x I_L e de ΔV_L x I_L . Explique os comportamentos da tensão DC e do “ripple” com o aumento da corrente de carga.
8	Qual é a faixa de correntes de saída para a qual pode-se afirmar que a tensão de saída está regulada? Por quê?
9	Por que nesta fonte de tensão CC não se danifica qualquer componente quando se impõe um curto circuito em sua saída?

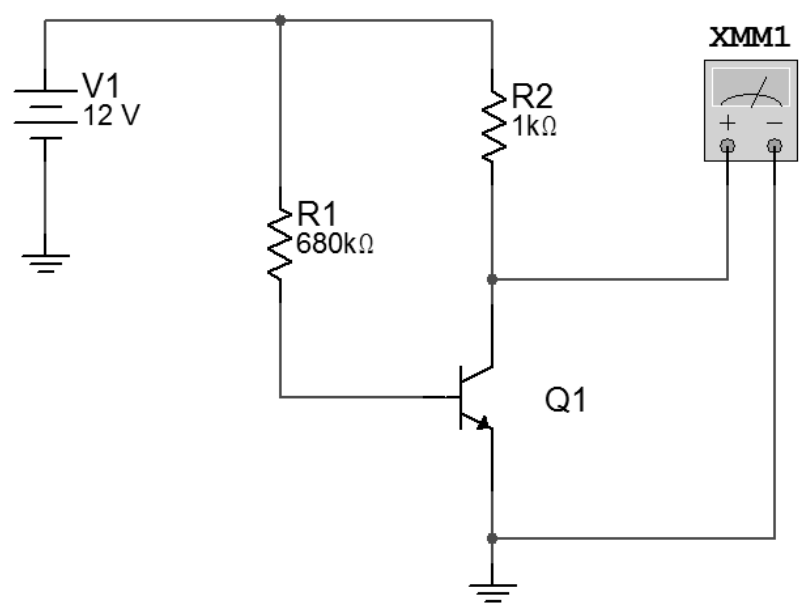
II. Transistores Bipolares de Junção (TBJ)

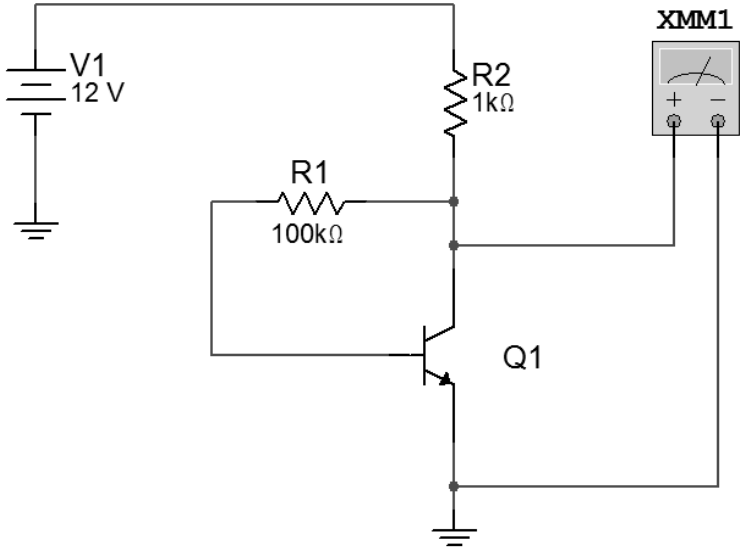
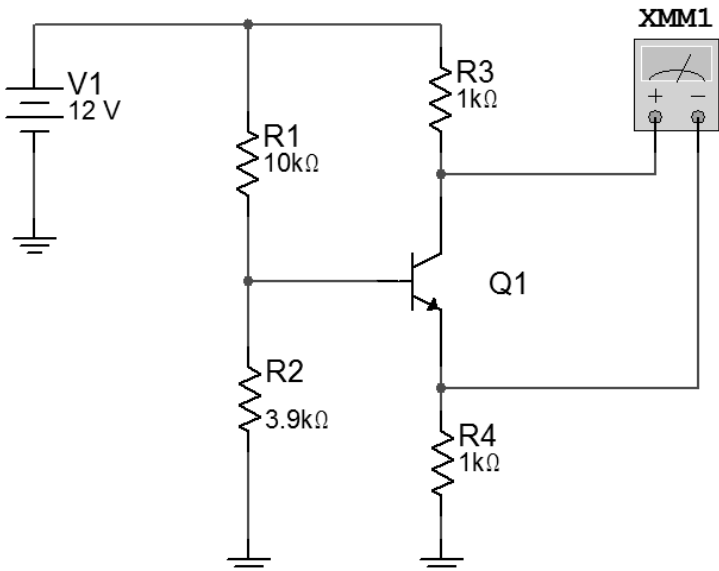
Experiência II.1: Chaveamento de LED por um TBJ.

1	Teoria: Um transistor pode operar como chave, isto é, trabalhando nas regiões de saturação (\equiv contato fechado) ou de corte (\equiv contato aberto). Ele também pode ser empregado como uma fonte de corrente.
2	<p>D1: diodo de sinal tipo BAX16 Q1: transistor tipo BC547</p> <p>Osciloscópio duplo feixe Gerador de áudio Fonte DC ajustável Multímetro 20KΩ - 1/4 W 1KΩ - 1/4 W Diodo de sinal Transistor BC547 (ou equivalente) led vermelho.</p>
3	Ajuste o gerador para sinal de onda quadrada, 10Hz & 5Vp.
4	Calcule os valores de I_B , I_C e V_{CE} no circuito do item (2) para $V_e = \pm 5V$.
5	Monte o circuito do item (2), meça I_B , I_C e V_{CE} e compare com os valores teóricos obtidos no item anterior.

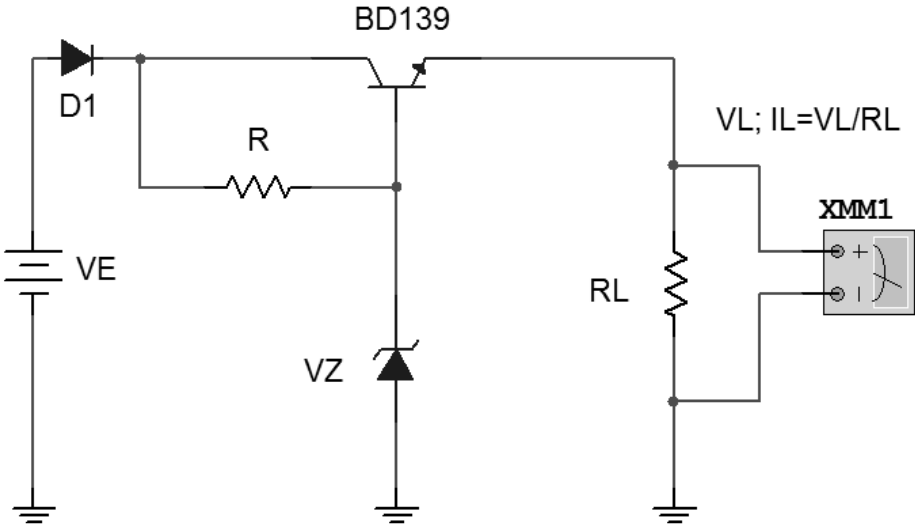
6	 <p>Obs.: R1 poderia ser um curto, no entanto, foi fixado num valor relativamente baixo, veja item (2), pois ele compõe com o diodo D1 um limitador de tensão de -0.6V.</p>
7	Calcule os valores de I_B , I_C e V_{CE} no circuito do item (6) para $V_e = \pm 5V$.
8	Monte o circuito do item (6), meça I_B , I_C e V_{CE} e compare com os valores teóricos obtidos no item anterior.
9	Compare os circuitos dos itens (2) e (6) do ponto de vista da fixação da corrente I_C , isto é, da corrente através do LED.
10	Em qual circuito o fluxo luminoso é “mais controlado” e por que?

Experiência II.2: Polarização de um TBJ.

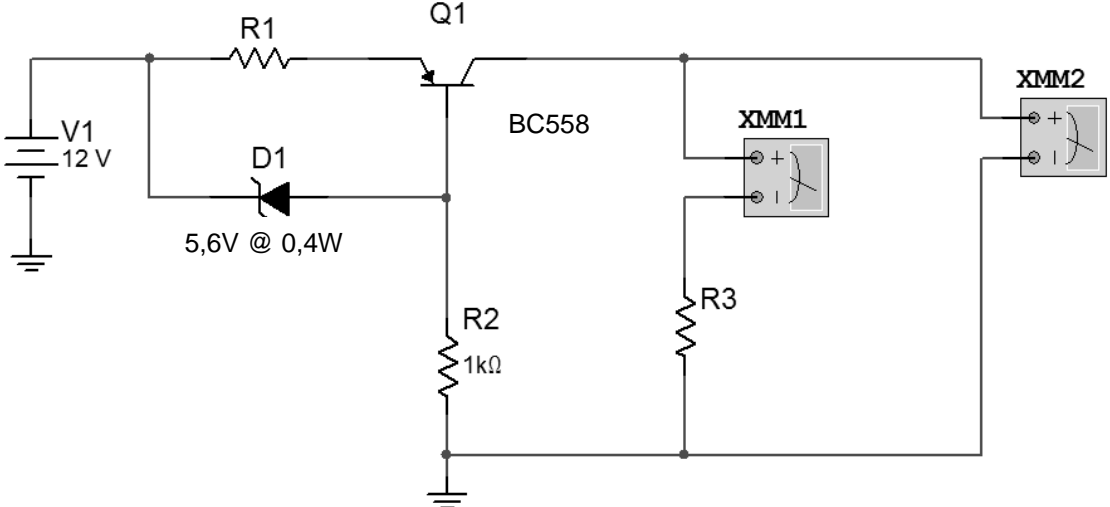
1	<p>Teoria: Para um transistor operar como amplificador ele deve ser polarizado em sua região ativa. Tipicamente se impõe VCE da ordem de VCC/2. Diversos tipos de circuitos de polarização podem ser empregados resultando desempenhos diferentes.</p>
2	 <p>Fonte DC ajustável Multímetro 680KΩ - 1/4 W 1KΩ - 1/4 W Transistor BC547 (ou equivalente).</p>
3	<p>Monte o circuito do item (2).</p>
4	<p>Calcule a polarização (I_{BQ}, I_{CQ} e V_{CEQ}) do transistor neste circuito (considere $\beta=300$).</p>
5	<p>Meça I_{BQ}, I_{CQ} e V_{CEQ} neste circuito, compare estas medidas com os valores teóricos obtidos no item (4) e explique discrepâncias.</p>

6	 <p>Fonte DC ajustável Multímetro 100KΩ - 1/4 W 1KΩ - 1/4 W Transistor BC547 (ou equivalente).</p>
7	<p>Monte o circuito do item (6) e repita os itens (4) e (5).</p>
8	 <p>Fonte DC ajustável Multímetro 10KΩ - 1/4 W 3K9Ω - 1/4 W 2 x 1KΩ - 1/4 W Transistor BC547 (ou equivalente).</p>
9	<p>Monte o circuito do item (8) e repita os itens (4) e (5).</p>
10	<p>Compare a estabilidade do ponto de polarização nas três montagens analisadas considerando que num transistor os parâmetros podem variar “bastante” (por exemplo, o ganho de corrente β).</p>

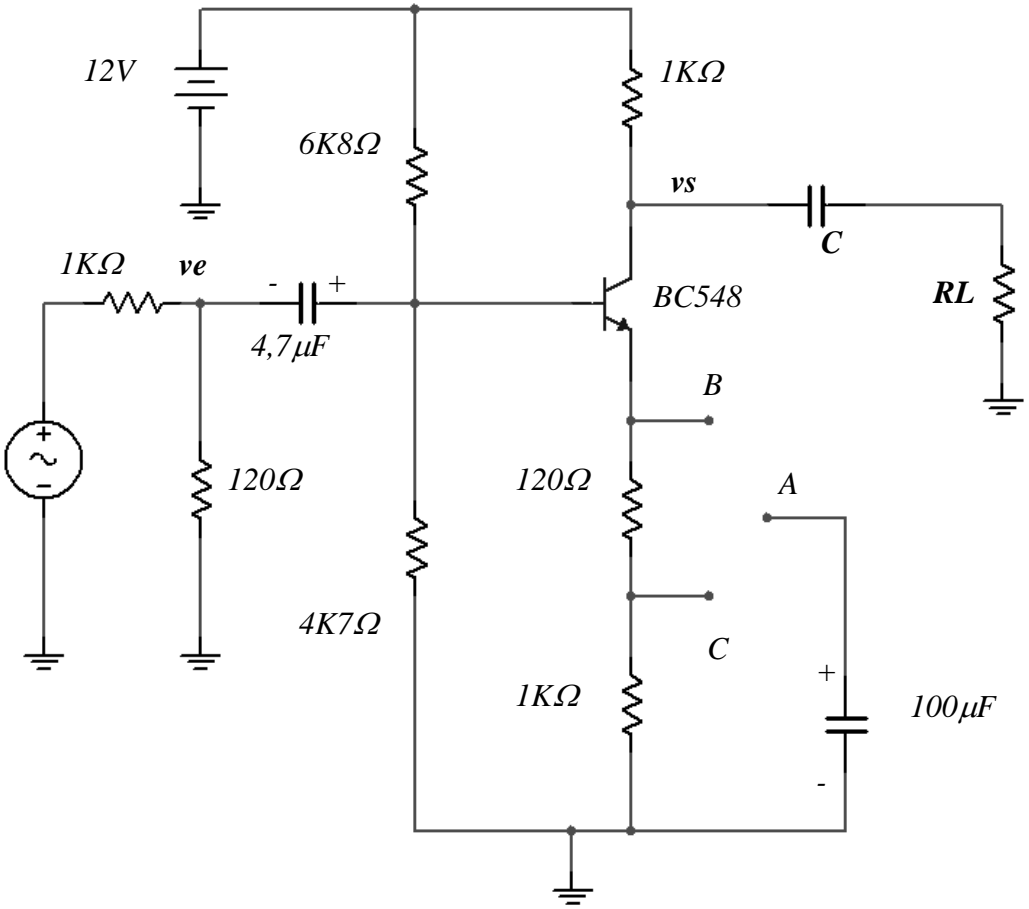
Experiência II.3: Fonte de tensão com BJT e diodo zener.

1	Teoria: Capítulo 5 (particularmente as seções 5.4 e 5.9) de [CIPELLI & MARKUS & SANDRINI – 2007].
2	 <p>Fonte DC ajustável Multímetro D1 = 1N4004 (ou equivalente) R= 470Ω - 1 W Transistor BD139 (ou equivalente) Zener= 5,6V – 0,4W 1KΩ - 1/4 W 2 x 100 Ω - 1/2 W .</p>
3	Monte o circuito do item (2) sendo VE= 9V; R= 470Ω; Zener= 5,6V @ 1W e para RL de acordo com o item 4.
4	<p>Variando RL no conjunto {50, 100, 200, 1000, ∞} [Ω] meça a tensão de saída (nos terminais do resistor de carga RL) bem como a tensão no zener. Calcule a corrente de saída ($I_L = V_L/R_L$) para cada caso.</p> <p><i>Observação: para obter $R_L = 50\Omega$, 100Ω e 200Ω use 2 resistores de 100Ω @ 0,5W associados adequadamente e para $R_L = 1K\Omega$ use o resistor de $1K\Omega$ @ 0,25 W.</i></p>
5	Faça o gráfico $V_L \times I_L$ com os resultados obtidos em (4).
6	Considerando o gráfico do item anterior explique o comportamento apresentado pela tensão de saída V_L em função da corrente de carga I_L .

Experiência II.4: Fonte de corrente com BJT e diodo zener.

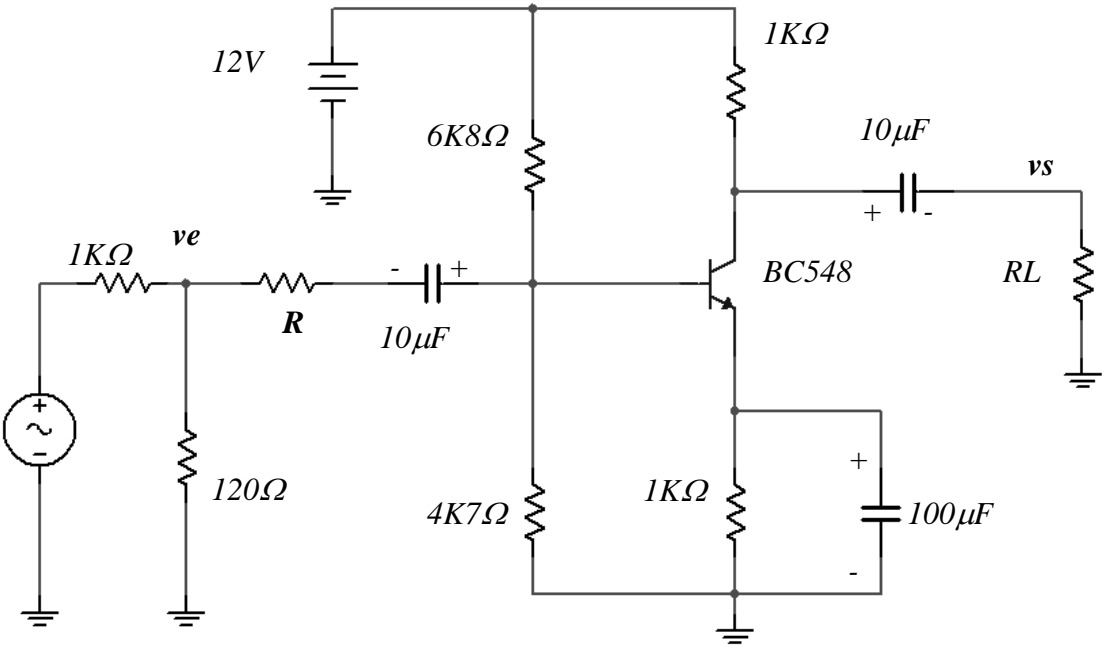
1	Teoria: Capítulo 5 (particularmente a seção 5.13) de [CIPELLI & MARKUS & SANDRINI – 2007].
2	 <p>Fonte DC ajustável Multímetro $R1 = 470\Omega - 1/4 W$ Transistor BC558 (ou equivalente) Zener= 5,6V – 0,4W 3 x 1KΩ - 1/4 W 2 x 100 Ω - 1/2 W .</p>
3	Monte o circuito do item (2).
4	<p>Variando R_L no conjunto $\{0, 100, 200, 500, 1000, \infty\}$ [Ω] meça a corrente de saída I_L (através de $R_L = R3$), a tensão de saída V_L (nos terminais de $R3$) e a tensão VCE do transistor $Q1$.</p> <p><i>Observação: associe adequadamente para obter $R3 = 100\Omega$ e 200Ω com 2 resistores de $100\Omega @ 0,5W$ e para obter $R_L = 500\Omega$ e $1K\Omega$ com 2 resistores de $1K\Omega @ 0,25 W$.</i></p>
5	Faça o gráfico $I_L \times V_L$ com os resultados obtidos em (4).
6	Considerando o gráfico do item anterior explique o comportamento apresentado pela corrente de saída I_L em função da resistência de carga R_L .

Experiência II.5: Ganho de amplificador EC (com e sem RE).

1	Objetivos: Ensaio de um estágio amplificador na montagem EC (com e sem resistor de emissor) para obtenção do ganho de tensão sem distorção. Estudo da distorção do sinal de saída para grandes excursões. Determinação da polarização.
2	Teoria: Seções 4.4, 4.5, 8.3 e 8.5 de [BOYLESTAD & NASHELSKY - 1996].
3	<p>Circuito:</p>  <p>Osciloscópio duplo feixe Gerador de áudio Fonte DC ajustável Multímetro Transistor BC548 (ou equivalente) 3 x 1KΩ - 1/4 W 2 x 120Ω - 1/4 W 6K8Ω - 1/4 W 4K7Ω - 1/4 W 4,7 μF (>20V) eletrolítico 100 μF (>20V) eletrolítico 22nF poliéster (observação: desconsidere C e RL).</p>
4	Monte o circuito apresentado no item (3). Inclua um capacitor de 22nF do coletor do transistor <u>para o terra</u> . Considere $RL = \infty$ (aberto) e $RE = RE1 (120\Omega) + RE2 (1K\Omega)$.
5	Meça os seguintes valores em corrente contínua: VCC, VCE, VBE, VRE e VRC.

6	<p>Obtenha a polarização do circuito, isto é, os valores teóricos de VCC, VCE, VBE, VRE e VRC. Compare com os valores medidos em (4).</p> <p>Dica: Exemplo 4.7 de [BOYLESTAD & NASHELSKY - 1996].</p>
7	<p>Interligue A com B (veja circuito) e aplique um sinal (senoidal, 1kHz) de amplitude tal que v_s seja uma senoide perfeita (sem deformação).</p>
8	<p>Meça com o osciloscópio (em Vpp) os sinais v_s e v_e. Obtenha o ganho de tensão. Verifique a defasagem entre o sinal de saída e o sinal de entrada.</p> <p><i>Observações:</i></p> <p>(a) Note a inversão de fase entre entrada e saída que corresponde a interpretação do sinal negativo do ganho.</p> <p>(b) $G = v_{s_{pp}} / v_{e_{pp}}$</p>
9	<p>Aumente o sinal de entrada de modo a gerar um sinal de saída distorcido. Registre os valores de v_e e v_s e a forma de onda do sinal de saída. Por que na forma de onda distorcida um dos semiciclos é “esticado” enquanto o outro é “contraído”?</p>
10	<p>Desconecte A e B, conecte A com C (veja circuito) e aplique um sinal (senoidal, 1kHz) de amplitude tal que v_s seja uma senoide perfeita (sem deformação).</p>
11	<p>Meça com o osciloscópio (em Vpp) os sinais v_s e v_e. Obtenha o ganho de tensão. Verifique a defasagem entre o sinal de saída e o sinal de entrada.</p> <p><i>Observações:</i></p> <p>(a) Note a inversão de fase entre entrada e saída que corresponde à interpretação do sinal negativo do ganho.</p> <p>(b) $G = v_{s_{pp}} / v_{e_{pp}}$</p>
12	<p>Calcule os valores teóricos (esperados) e compare com os obtidos em (8) e em (11).</p> <p>Dica: Exemplos 8.2, 8.5 e Figura 8.16 de [BOYLESTAD & NASHELSKY – 1996].</p>
13	<p>Aumente o sinal de entrada de modo a gerar um sinal de saída da ordem de 6Vpp. Registre (foto ou desenho) os valores de v_e e v_s e a forma de onda do sinal de saída. A distorção é maior ou menor que a obtida em (9)? Por quê?</p>

Experiência II.6: Impedâncias de entrada e de saída de amplificador EC.

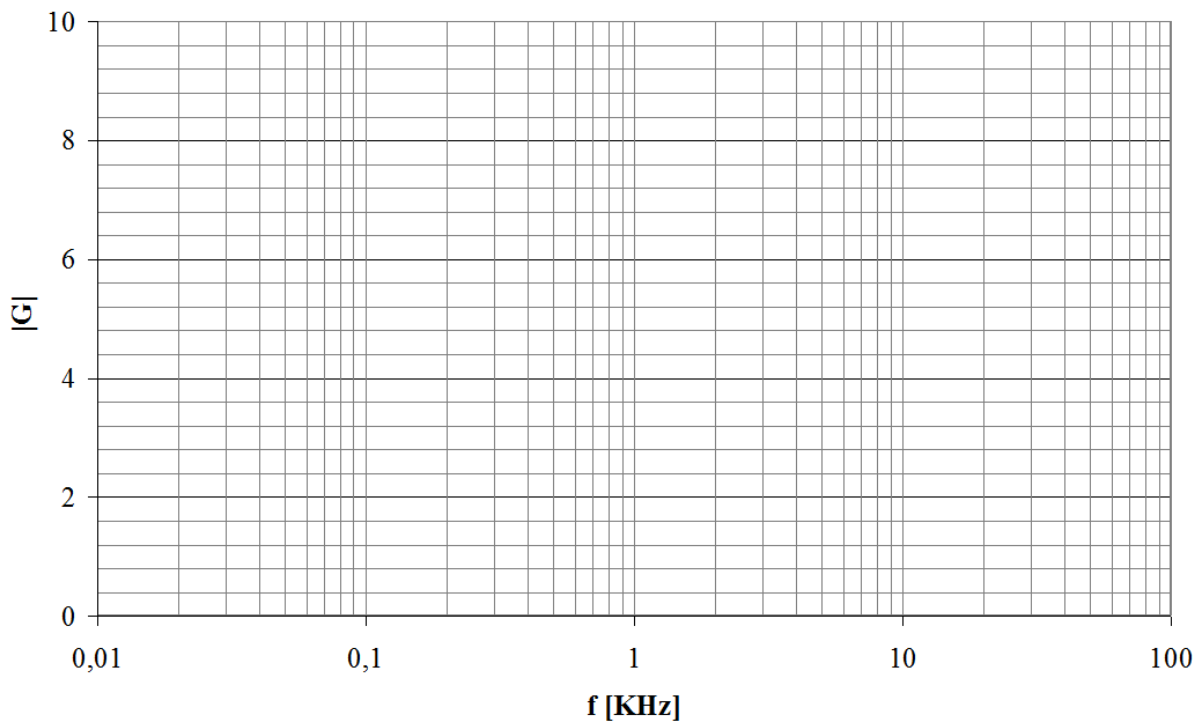
1	Objetivo: Ensaio sem distorção de um estágio amplificador na montagem EC para determinação das impedâncias de entrada e de saída.
2	Teoria: Seção 8.3 de [BOYLESTAD & NASHELSKY – 1996].
3	<p>Circuito:</p>  <p>Osciloscópio duplo feixe Gerador de áudio Fonte DC ajustável Multímetro Transistor BC548 (ou equivalente) 4 x 1KΩ - 1/4 W 120Ω - 1/4 W 6K8Ω - 1/4 W 4K7Ω - 1/4 W 1K5Ω - 1/4 W 2 x 10 μF (>20V) eletrolítico 100 μF (>20V) eletrolítico.</p>
4	Monte o circuito apresentado no item (3). Faça $RL = \infty$ e $R = 0\Omega$ (curto-circuito).
5	Aplique um sinal (senoidal, 1kHz) de amplitude tal que v_e assumo o valor 20mVpp (utilize o osciloscópio para ajustar este valor).
6	Com o osciloscópio meça o sinal AC de saída em Vpp.
7	Altere R para o valor 1K5Ω e aplique um sinal (senoidal, 1kHz) de amplitude tal que v_e assumo novamente o valor 20 mVpp. Meça o sinal AC de saída em Vpp.
8	Calcule $R_i = \frac{v_s(7)}{v_s(6) - v_s(7)} 1K5\Omega$.
9	Insira um resistor de carga (RL) de valor 1KΩ e retorne o valor de R para 0Ω (curto-circuito).

10	Aplique um sinal (senoidal, 1 kHz) de amplitude tal que v_e assuma o valor 20 mVpp.
11	Meça o sinal AC de saída em Vpp.
12	Faça $R_L = \infty$ (aberto) e aplique um sinal (senoidal, 1kHz) de amplitude tal que v_e assuma novamente o valor 20 mVpp. Meça o sinal AC de saída em Vpp.
13	Calcule $R_o = \frac{v_s(12) - v_s(11)}{v_s(11)} 1K\Omega$.
14	Compare os valores medidos de R_i , item (8), e R_o , item (13), com valores estimados teoricamente - consulte a referência indicada no item (2) para obter os valores teóricos de R_i e R_o .
15	Explique como foram obtidas as expressões dos cálculos das resistências de entrada e de saída respectivamente empregadas nos itens (8) e (13).
16	Meça o ganho máximo (G_{max}) deste amplificador, isto é, para $R_L = \infty$ e $R = 0\Omega$ (considere R como sendo a resistência interna do gerador AC de entrada).
17	Em geral o ganho efetivo de um amplificador é menor que G_{max} , pois “há perda de tensão” entre a resistência interna do gerador e a impedância de entrada do amplificador bem também entre a resistência de saída do amplificador e a resistência de carga. Vamos verificar esta afirmação.
18	Estime a tensão de saída v_s em Vpp sendo a tensão de entrada $v_e = 10$ mVpp. Confirme este valor.

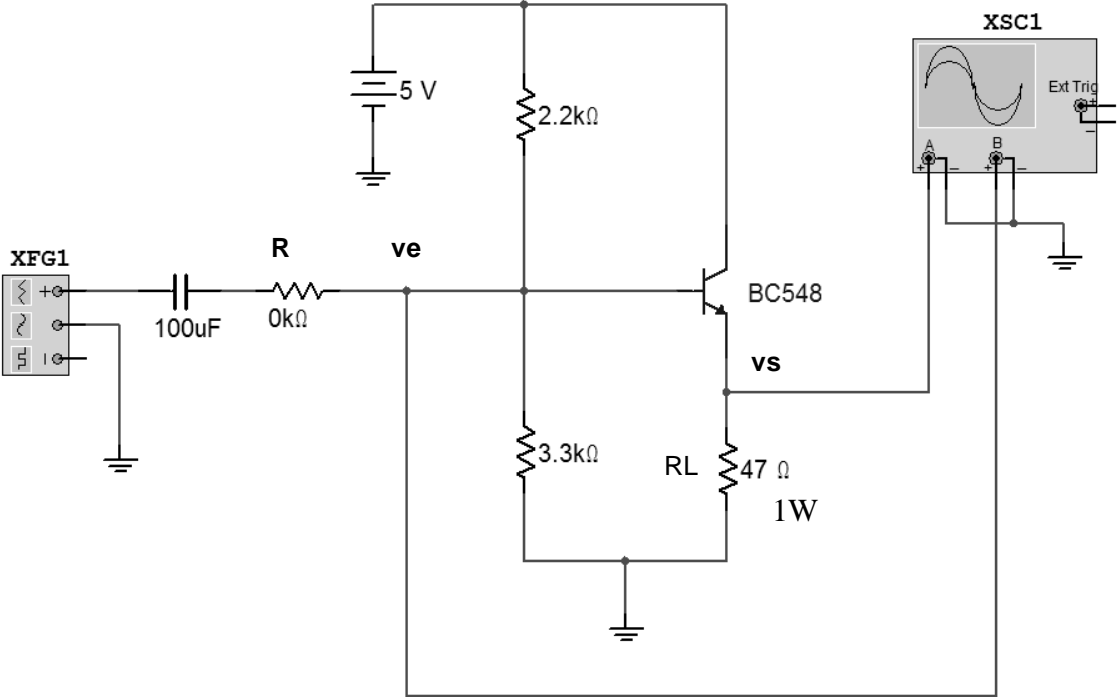
Experiência II.7: Resposta em frequência de amplificador EC.

1	Objetivo: Ensaio sem distorção de um estágio amplificador na montagem EC (com e sem resistor de emissor) para determinação da resposta em frequência.
2	Teoria: seções 4.4, 4.5, 11.6 e 11.9 de [BOYLESTAD & NASHELSKY – 1996].
3	<p>Circuito:</p> <p>Osciloscópio duplo feixe Gerador de áudio Fonte DC ajustável Multímetro Transistor BC548 (ou equivalente) 3 x 1KΩ - 1/4 W 2 x 100Ω - 1/4 W 6K8Ω - 1/4 W 4K7Ω - 1/4 W 1 μF (>20V) eletrolítico 100 μF (>20V) eletrolítico 33nF poliéster.</p>
4	Monte o circuito apresentado no item (3).
5	Note que $R_L = \infty$ (aberto).

6	<p>Calcule:</p> $R_i = R_{B1} // R_{B2} // h_{fe} R_{E1}; R = R_{E1} // R_{E2}; f_{i'} = \frac{1}{2\pi R_i C_1} \text{ e } f_{i''} = \frac{1}{2\pi R C_3}$ <p>e $f_i = \max\{f_{i'}, f_{i''}\}$</p> $R_o = R_C \text{ e } f_s = \frac{1}{2\pi R_o C_2}$
7	<p>Monte uma Tabela com as seguintes colunas: frequência, tensão de saída v_s (em Vpp) e do ganho de tensão G. As frequências devem assumir os valores (linhas desta Tabela) do conjunto $\{20, 50, 200, 500, 2K, 5K, 20K\}$ [Hz].</p>
8	<p>Preencha a tabela: para cada frequência fixe v_e em 0,5Vpp, meça a tensão AC de saída v_s em Vpp e calcule o ganho de tensão v_s/v_e.</p>
9	<p>A partir desta Tabela, construa o gráfico $G \times f$ e obtenha os valores das frequências de corte inferior f_i e superior f_s. Compare estes resultados com os valores calculados.</p>



Experiência II.8: Amplificador em CC (seguidor de emissor).

1	Teoria: Seção 8.5 de [BOYLESTAD & NASHELSKY – 1996].
2	<p>Circuito:</p>  <p>Osciloscópio duplo feixe Gerador de áudio Fonte DC ajustável Multímetro Transistor BC548 (ou equivalente) 2K2Ω - 1/4 W 3K3Ω - 1/4 W 47Ω - 1 W 100 µF (>20V) eletrolítico.</p>
3	Calcule (veja exemplo 8.7 de [BOYLESTAD & NASHELSKY – 1996]) a polarização do transistor e as grandezas I_E , r_e , R_i , R_o e A_v .
4	Com o gerador de áudio em aberto, ajuste-o em $v_e = 1V_{pp}$, 1KHz, senoidal.
5	Interligue o resistor de carga R_L diretamente aos terminais do gerador.
6	Meça a tensão sobre a carga em V_{pp} . Por que resulta um sinal muito menor que o ajustado em (4)?
7	Monte o circuito apresentado no item (2) com o gerador desligado.
8	Meça as tensões (em CC) sobre os resistores de base, de emissor e o VCE. Compare os valores calculados em (3) com os medidos.
9	Ligue o gerador e ajuste-o em $v_e = 1V_{pp}$, 1KHz, senoidal.
10	Meça a tensão sobre a carga (v_s) em V_{pp} . Verifique a defasagem entre o sinal de saída e o sinal de entrada.

11	Compare o sinal sobre a carga com o fornecido pelo gerador. Calcule o ganho em tensão $ Av = v_s(\text{medido em } 10) / v_e(\text{ajustado em } 9) = v_s(10) / v_e(9) $.
12	Embora o ganho de tensão A_v neste caso seja aproximadamente unitário, em alguns casos este tipo de estágio costuma ser empregado. Por que?
13	Altere R para $1K5\Omega$ e meça v_s .
14	Calcule $R_i = \frac{v_s(13)}{v_s(10) - v_s(13)} 1K5\Omega$.
15	Compare os valores obtidos com os valores calculados em (3)
16	Aumente a tensão de entrada até que ocorra distorção na tensão de saída. Verifique o limite de excursão do sinal de saída em V_{pp} . Compare este valor com a tensão da fonte de alimentação.
17	(opcional) Ajuste a tensão de saída em $0,35V_{pp}$ e altere a carga de um resistor para um altofalante com a mesma impedância (45Ω). Meça a potência AC na carga. Varie a frequência e estime em média (e nestas condições) as frequências mínima e máxima que ouvido humano responde.

Experiência II.9: Estágio de saída em simetria complementar

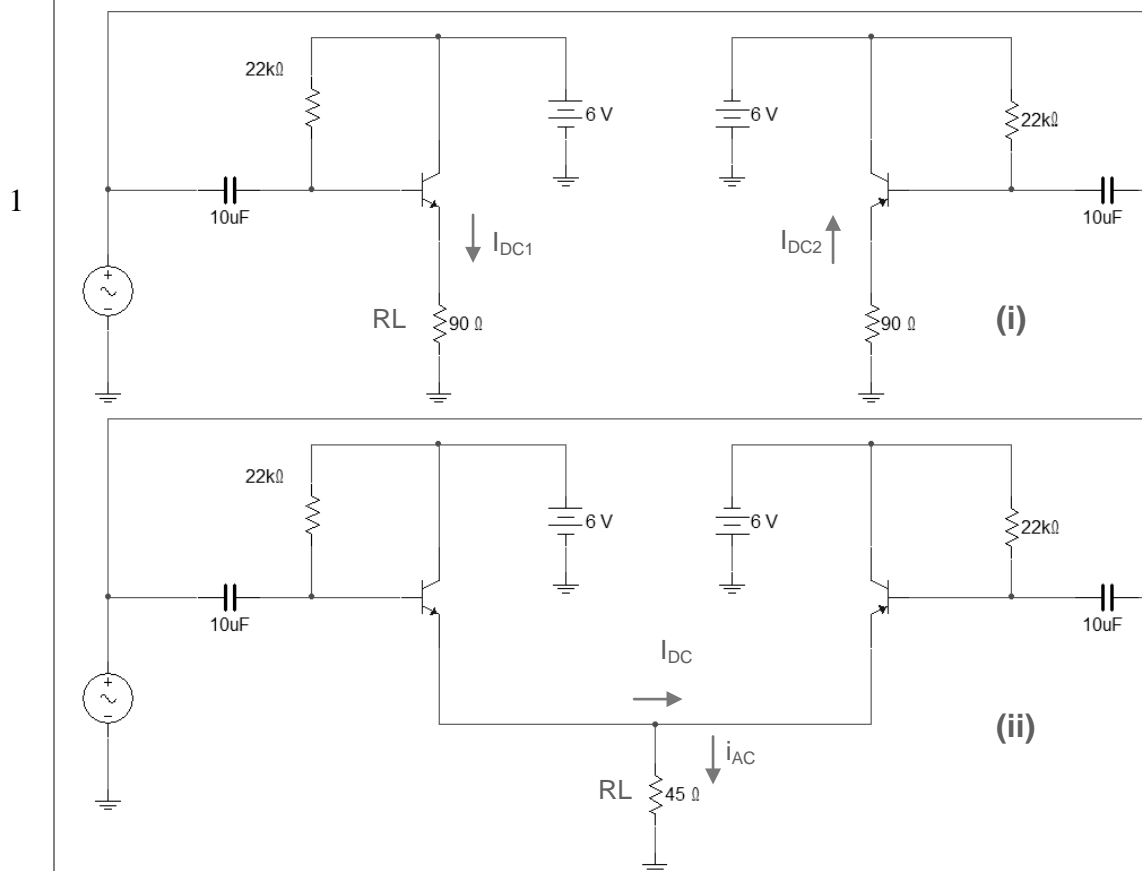
Teoria:

O amplificador em montagem CC pode ser utilizado para injetar “alta corrente AC” em cargas de “baixa impedância”, tipicamente altofalantes ($R_L \sim 16\Omega$).

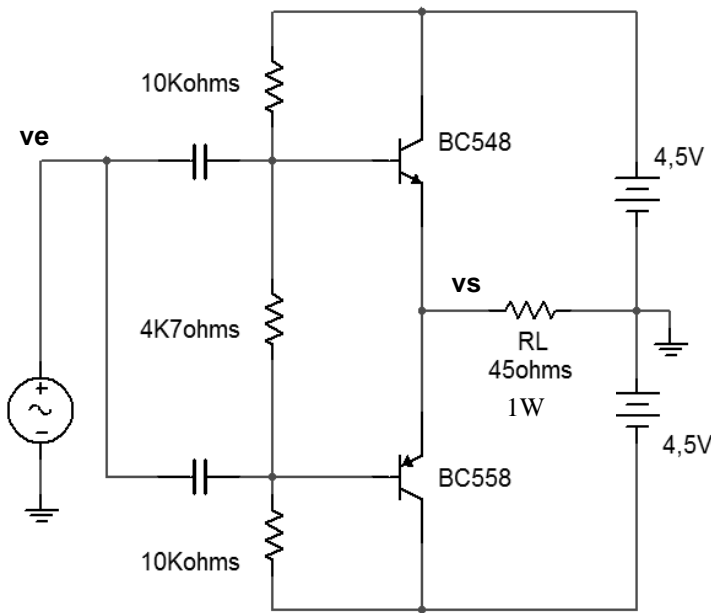
Verificou-se na experiência passada que a impedância de entrada R_i deste estágio é tipicamente igual a $h_{fe} \times R_L \sim 100 \times 16 \sim 2K\Omega$. Valores de R_i desta ordem de grandeza não carregam o estágio anterior e esta é uma característica procurada para estágios de saída (ou excitadores).

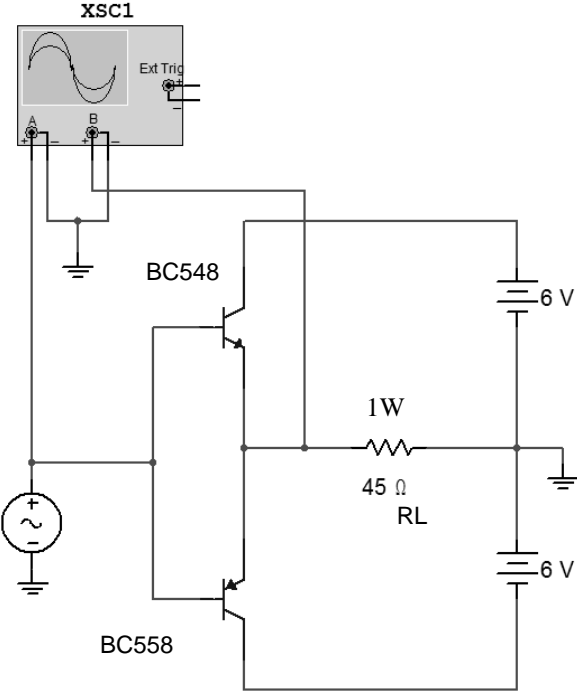
Usando um altofalante diretamente no emissor, a corrente DC irá passar sobre esta carga, ver Figura (i) abaixo, o que não é conveniente, pois o seu cone ficará com um deslocamento inicial.

Para resolver este problema poder-se-ia colocar um capacitor de desacoplamento entre um resistor de emissor, usado para polarizar o transistor, e o altofalante. Entretanto este capacitor teria um alto valor devido à baixa impedância da carga.

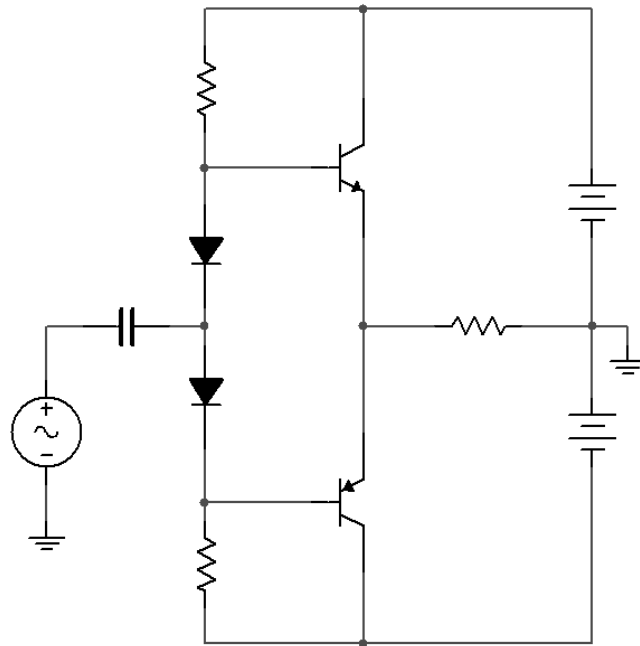


Uma outra solução é apresentada na Figura (ii). Faz-se uso de dois amplificadores em montagem CC sendo que um deles utiliza transistor NPN e o outro transistor PNP simétrico, isto é, com as “mesmas características” (β , h_{fe} , h_{ie} etc).

	<p>O caso de uma simetria perfeita resulta em $I_{DC1} = I_{DC2}$ implicando que no circuito (ii) apenas a corrente alternada é acoplada a carga não sendo mais necessário o uso de capacitores de valores elevados.</p> <p>Outra vantagem do circuito (ii) é que nele pode ser imposto um valor menor para a corrente I_{DC} comparativamente aos valores das correntes I_{DC1} ou I_{DC2} do circuito (i). Nesta condição os transistores de saída no circuito (ii) dissipam, em condição quiescente, uma menor potencia.</p>
2	<p>Circuito:</p>  <p>RL= alto-falante 45Ω @ 1/4 W (ou resistor de 47Ω @ 1/4W) Osciloscópio duplo feixe Gerador de áudio 2 x Fonte DC ajustável Multímetro Transistores BC548 e BC558 (ou equivalentes) 2 x 10KΩ - 1/4 W 4K7Ω - 1/4 W 2 x 220 nF poliéster.</p>
3	<p>Monte o circuito apresentado no item (2) e ajuste o gerador de áudio em $v_e = 1V_{pp}$, senoidal e de frequência 1KHz.</p>
4	<p>Meça a tensão sobre a carga (sinal de saída v_s) em V_{pp}. Calcule o ganho e tensão $A_v = v_s/v_e$.</p>
5	<p>Aumente a tensão do gerador até o limite em que ocorre distorção do sinal de saída. Meça este valor em V_{pp} e compare com o valor V_1+V_2 das fontes DC. Explique este resultado.</p>
6	<p>Nas condições do item (5) calcule as potencias na carga, em cada transistor e a fornecida pela fonte. Calcule o rendimento resultante para este circuito.</p>
7	<p>Monte o circuito apresentado no item (8).</p>

8	
9	Com um sinal de entrada de 0,5Vpp, senoidal e de frequência 1KHz meça e registre a forma de onda do sinal de saída.
10	Repita o item (9) para uma amplitude de 8Vpp.
11	Explique o que é a distorção de “crossover” e responda: em qual das amplitudes (do item 9 ou do 10) ela é mais significativa?
12	Explique como o circuito apresentado no item (13) reduz significativamente a distorção de “crossover”.

13

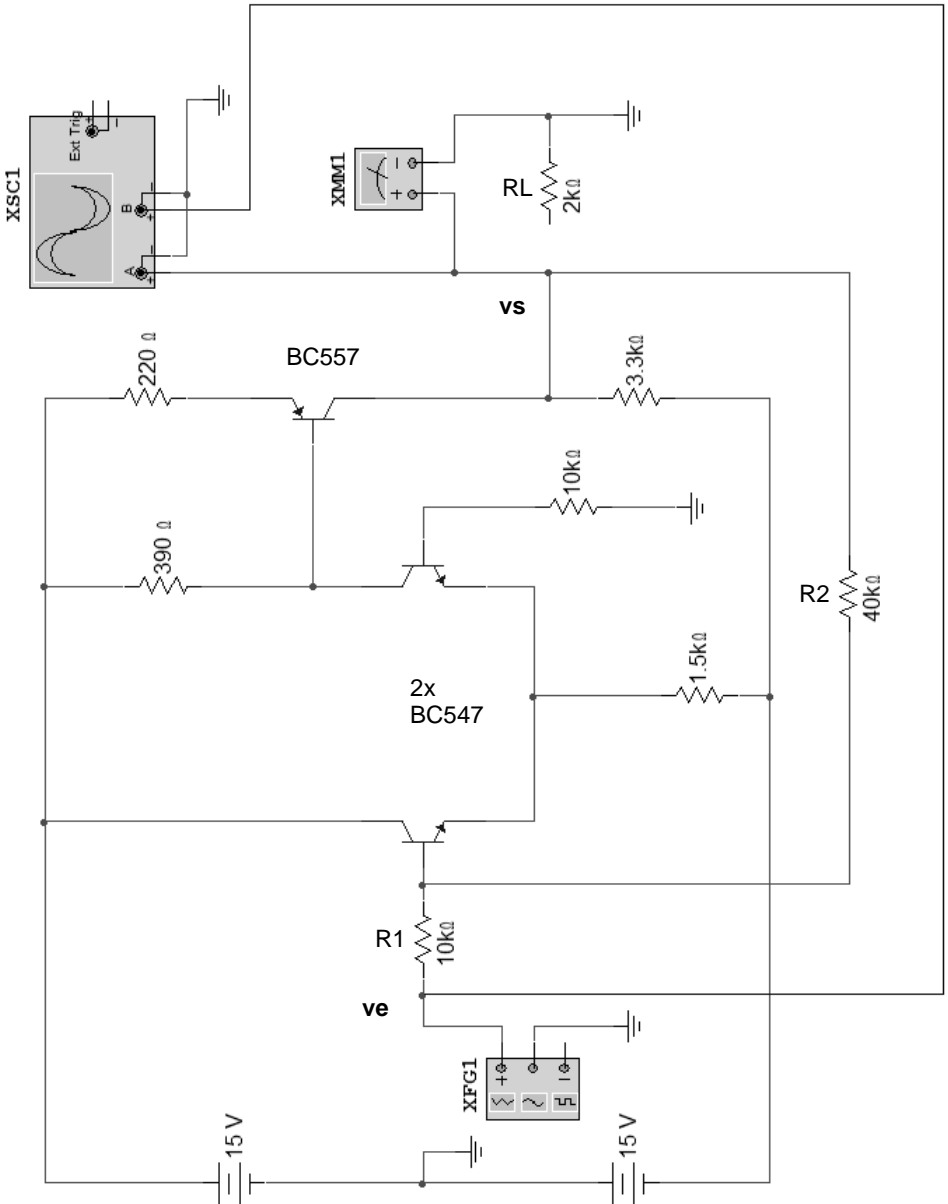


Experiência II.10: Amplificador Diferencial.

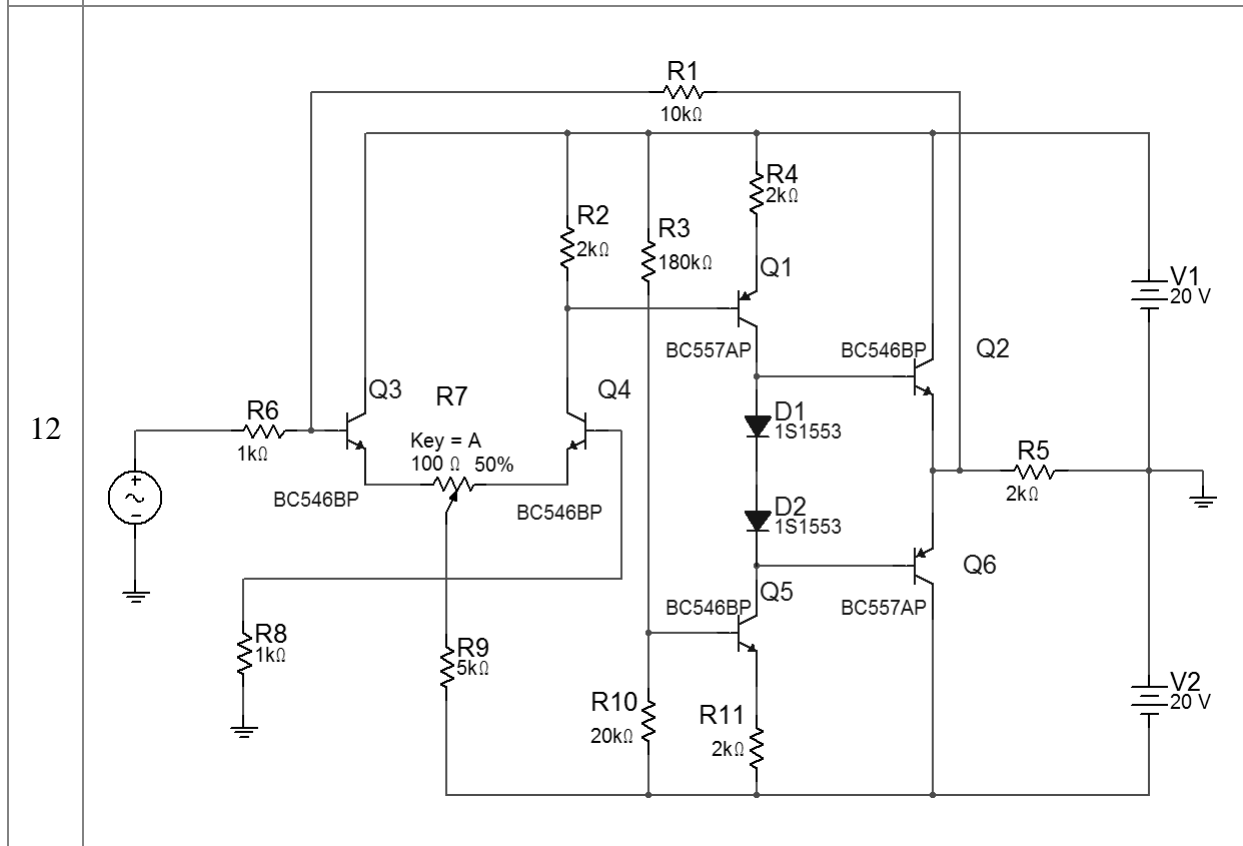
1	Teoria: Seção 12.9 de [BOYLESTAD & NASHELSKY – 1996].
2	<p>Circuito:</p> <p>Osciloscópio duplo feixe Gerador de áudio 2 x Fonte DC ajustável Multímetro 2 x Transistor BC547 (ou equivalente) 2 x 4K7Ω - 1/4 W 2 x 1K5Ω - 1/4 W 2 x 47Ω - 1/4 W 2 x .22µF poliéster.</p>
3	Monte o circuito apresentado no item (2).
4	Ajuste o gerador nas seguintes condições: 0Vpp, senoidal e frequência de 1KHz.
5	<p>Calcule as tensões em CC sobre todos os resistores e a tensão VC do coletor de Q2 para o terra.</p> <p>Dica: veja o Exemplo 12.19 de [BOYLESTAD & NASHELSKY – 1996].</p>
6	Meça em CC as tensões sobre todos os resistores e a tensão VC. Compare os valores obtidos com os calculados no item (5).
7	<p>Calcule o ganho diferencial (Gd) e o de modo comum (Gmc). Calcule também o RRMC.</p> <p>Dica: veja os Exemplos de 12.19 a 12.20 de [BOYLESTAD & NASHELSKY – 1996].</p>

8	Interligue o capacitor C2 para o terra e ajuste o gerador (v_e) para 1Vpp.
9	Meça o sinal AC do coletor de Q2 para o terra (v_c) em Vpp. Verifique a defasagem entre v_e e v_s . Calcule $ G_d = v_c/v_e$.
10	Desconecte o capacitor C2 do terra e interligue-o no gerador.
11	Meça o sinal AC do coletor de Q2 para o terra (v_c) em Vpp. Verifique a defasagem entre v_e e v_s . Calcule $ G_{mc} = v_c/v_e$.
12	Compare os valores dos ganhos obtidos com os calculados no item (7).

Experiência II.11: Amplificador Operacional Discreto.

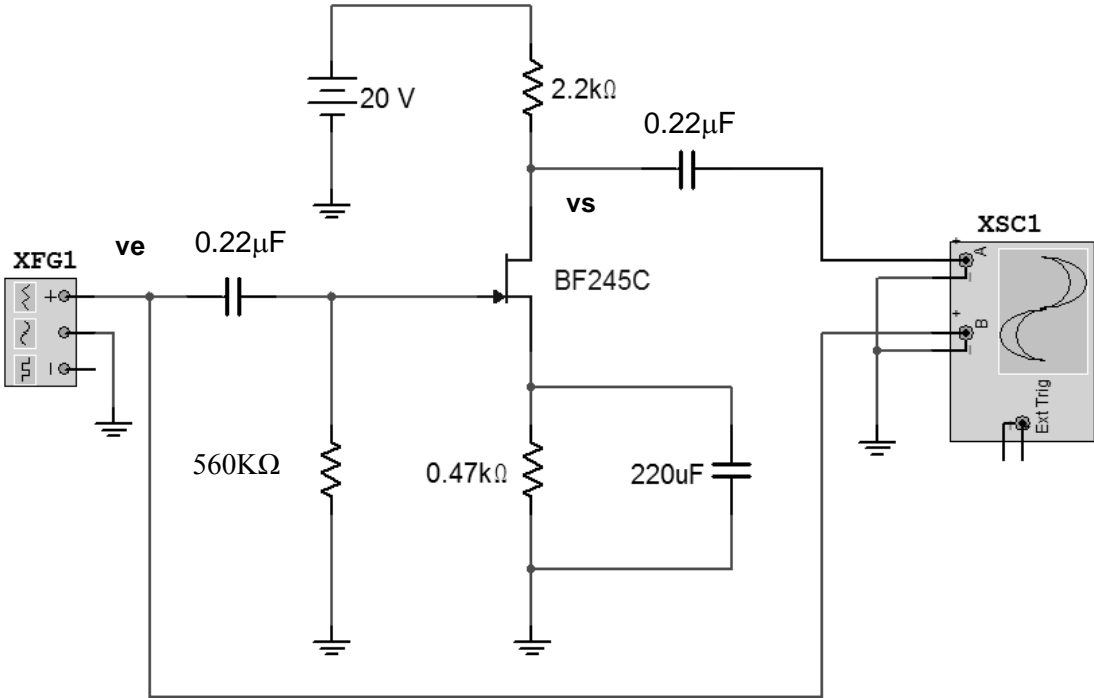
1	Teoria: Capítulo 12 (particularmente a seção 12.6) de [BOGART – 2001].
2	<p>Circuito:</p>  <p>Osciloscópio duplo feixe Gerador de áudio 2 x Fonte DC ajustável Multímetro 2 x Transistor BC547 (ou equivalente) Transistor BC557 (ou equivalente) 2 x 10KΩ - 1/4 W 1K5Ω - 1/4 W 390Ω - 1/4 W 220Ω - 1/4 W 3K3Ω - 1/4 W 39KΩ - 1/4 W 2K2Ω - 1/4 W.</p>
3	Monte o circuito apresentado no item (2).
4	Ajuste o gerador (ve) nas seguintes condições: 0Vpp, senoidal e frequência de 1KHz.

5	Calcule as tensões em CC sobre todos os resistores e a tensão de saída vs no coletor do transistor PNP.
6	Meça em CC as tensões sobre todos os resistores e a tensão vs. Compare os valores obtidos com os calculados no item (5).
7	O ganho de tensão deste circuito é dado pela expressão $G = -R2/R1$ (veja experiência V.1). Calcule-o.
8	Ajuste o gerador (ve) para 7 Vpp.
9	Meça o sinal de saída vs em Vpp. Verifique a defasagem entre ve e vs. Calcule $ G = vs/ve$. Compare o resultado com o calculado em (7).
10	Interligue a carga de 2KΩ na saída do circuito. Meça e registre a forma de onda do sinal de saída. Ocorreu distorção? Por que?
11	Explique o funcionamento do Amplificador Operacional discreto apresentado no item (12). Dica: Secção 12.6 de [BOGART – 2001].



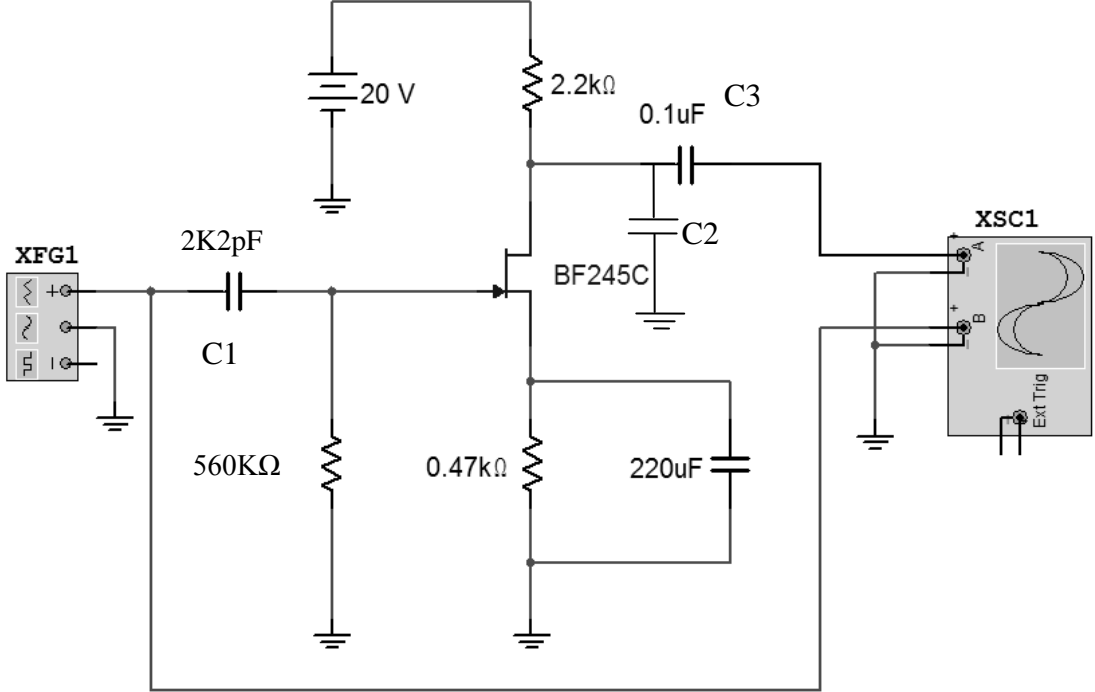
III. FET

Experiência III.1: Amplificador SC com JFET.

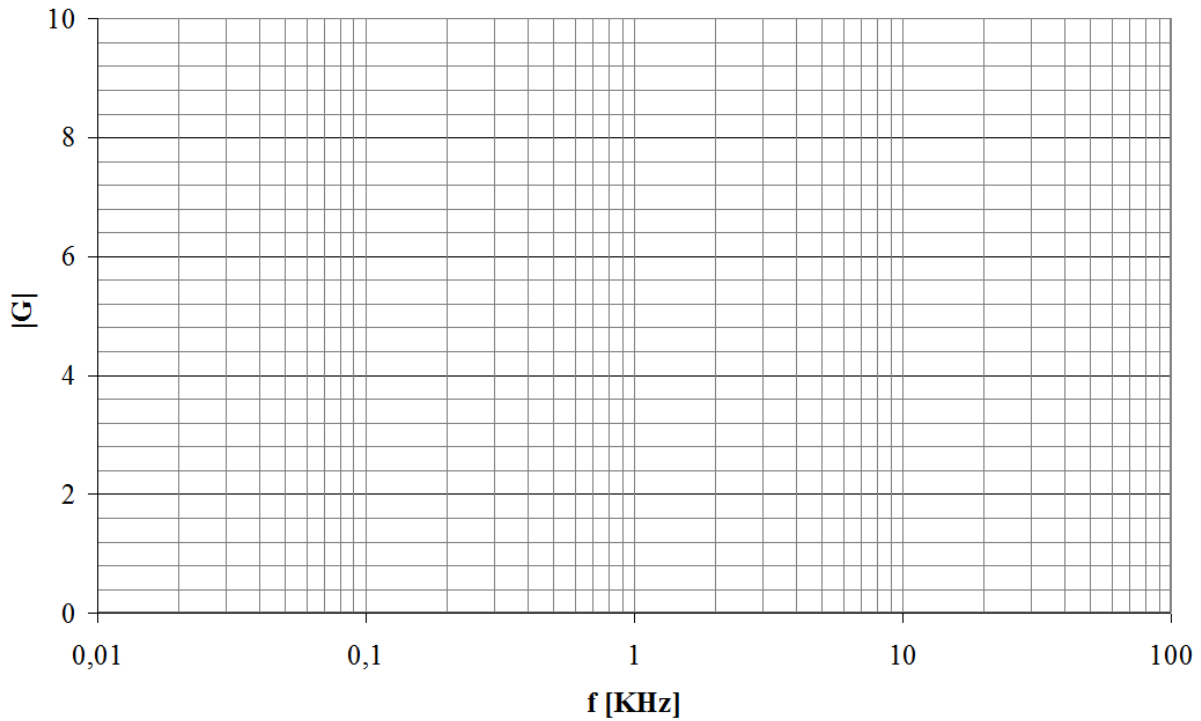
1	Teoria: Seções 6.3 e 9.4 de [BOYLESTAD & NASHELSKY – 1996].
2	<p>Circuito:</p>  <p style="text-align: right;">BF245: $I_{DSS} = 12\text{mA}$; $V_P = -6\text{V}$</p> <p>Osciloscópio duplo feixe Gerador de áudio Fonte DC ajustável Multímetro Transistor JFET BF245 (ou equivalente) 560KΩ - 1/4 W 2K2Ω - 1/4 W 470Ω - 1/4 W 220 µF (>20V) eletrolítico 2 x 0.22µF poliéster.</p>
3	Monte o circuito apresentado no item (2).
4	Meça os seguintes valores em corrente contínua: VDS, VGS, VRG, VRS e VRD.
5	Ajuste o gerador (ve) nas seguintes condições: 1Vpp, senoidal e frequência de 1KHz.
6	Obtenha a polarização do circuito, isto é, os valores teóricos de VDS, VGS, VRG, VRS e VRD. Compare com os valores medidos em (5). Dica: Exemplo 6.2 de [BOYLESTAD & NASHELSKY – 1996].
7	Meça com o osciloscópio (em Vpp) os sinais vs e ve. Obtenha o ganho de tensão. Verifique a defasagem entre o sinal de saída e o sinal de entrada.

	<p><i>Observações:</i></p> <p>(c) Note a inversão de fase entre entrada e saída que corresponde a interpretação do sinal negativo do ganho (ver “Teoria”).</p> <p>(d) $G = v_{s_{pp}} / v_{e_{pp}}$</p>
8	<p>Calcule o ganho de tensão esperado teóricamente. Compare com o valor medido em (7).</p> <p>Dica: Exemplo 9.7 de [BOYLESTAD & NASHELSKY – 1996].</p>
9	<p>Aumente o sinal de entrada de modo a gerar um sinal de saída distorcido. Registre os valores de v_e e v_s e a forma de onda do sinal de saída. Explique como e porque ocorreu a distorção do sinal de saída.</p>
10	<p>Calcule:</p> <p>$R_i = R_G$ e $R_o = R_D$</p>
11	<p>Verifique que os valores teóricos de R_i e R_o, estimados no item (10), estão corretos.</p> <p>Dica: (1) Insira um resistor de $1M\Omega$ em serie com o gerador e verifique que a tensão de saída diminui pela metade. Retire este resistor, coloque um resistor de carga de $2,2 K\Omega$ (após capacitor de $0,1 \mu F$) e verifique que a tensão de saída diminui pela metade. Explique este item</p>

Experiência III.2: Resposta em frequência de amplificador SC.

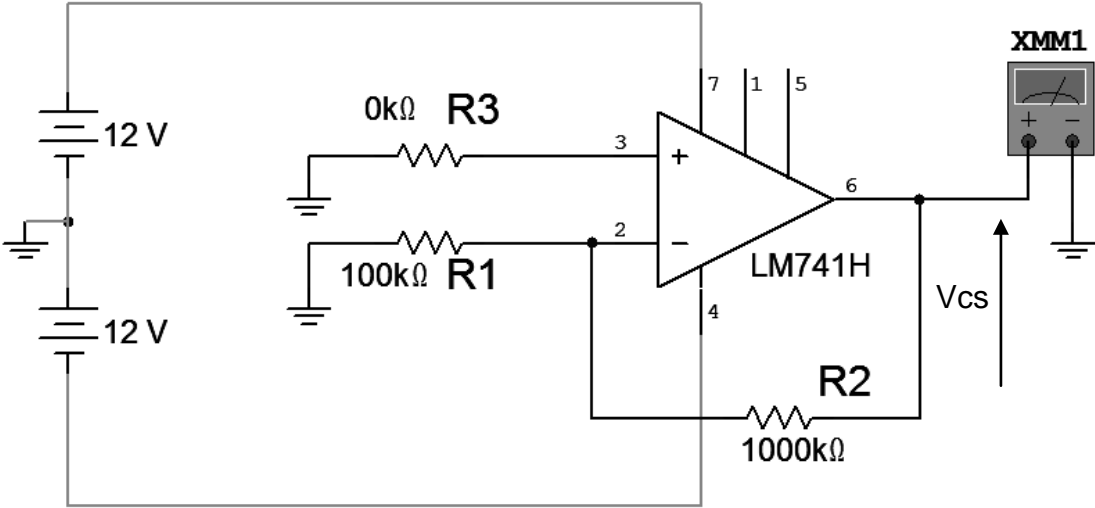
1	Objetivo: Ensaio sem distorção de um estágio amplificador na montagem SC para determinação da resposta em frequência.
2	Teoria: seções 11.7, e 11.10 de [BOYLESTAD & NASHELSKY – 1996].
3	<p>Circuito:</p>  <p>Osciloscópio duplo feixe Gerador de áudio Fonte DC ajustável Multímetro Transistor JFET BF245 (ou equivalente) 560KΩ - 1/4 W 2K2Ω - 1/4 W 470Ω - 1/4 W 220 µF (>20V) eletrolítico 2K2pF poliéster 10KpF poliéster 0.1µF poliéster.</p>
4	Monte o circuito apresentado no item (3) com C2= 10KpF.
5	Note que $R_L = \infty$ (aberto).
6	<p>Calcule:</p> $R_i = R_G; f_{i'} = \frac{1}{2\pi R_i C_1}$ $R_o = R_D \text{ e } f_s = \frac{1}{2\pi R_o C_2}$
7	Monte uma Tabela com as seguintes colunas: frequência, tensão de saída v_s (em Vpp) e do ganho de tensão G . As frequências devem assumir os valores (linhas desta Tabela) do

	conjunto {20, 50, 100, 200, 500, 2K, 5K, 10K, 20K} [Hz].
8	Preencha a tabela: para cada frequência fixe v_e em 0,5Vpp, meça a tensão AC de saída v_s em Vpp e calcule o ganho de tensão v_s/v_e .
9	A partir desta Tabela, construa o gráfico $ G \times f$ e obtenha os valores das frequências de corte inferior f_i e superior f_s . Compare estes resultados com os valores calculados.
10	Retirando-se o capacitor C2 estime a frequência de corte superior por meio de medida adequada. Descreva o processo de medida adotado neste caso.

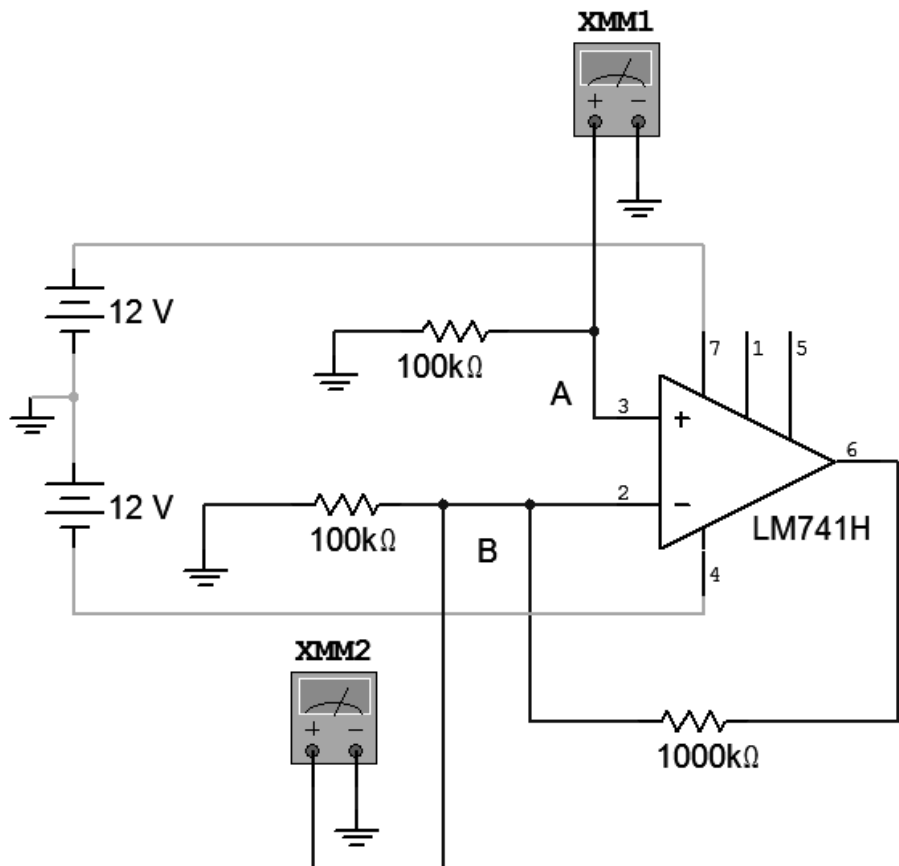


IV. Medidas de parâmetros de um AO

Experiência IV.1: Tensão de compensação de entrada.

1	<p>Teoria:</p> <p>Ganho em malha fechada: $A_{mf} = \frac{R_2}{R_1}$</p> <p>Tensão de compensação de entrada: $V_{comp_ent} = \frac{V_{cs}}{A_{mf}}$</p>
2	<p>Circuito:</p>  <p>2 x Fonte DC ajustável Multímetro AO 741 100KΩ - 1/4 W 1MΩ - 1/4 W.</p>
3	<p>Meça a tensão de saída (V_{cs}) com o voltímetro.</p>
4	<p>Calcule a tensão de compensação de entrada V_{comp_ent}, pela fórmula apresentada em (1).</p>
5	<p>Mude R3 para o valor dado por $R1/R2$ e repita os itens (3) e (4).</p>
6	<p>Compare os valores obtidos com os equivalentes aos fornecido pelo fabricante.</p>

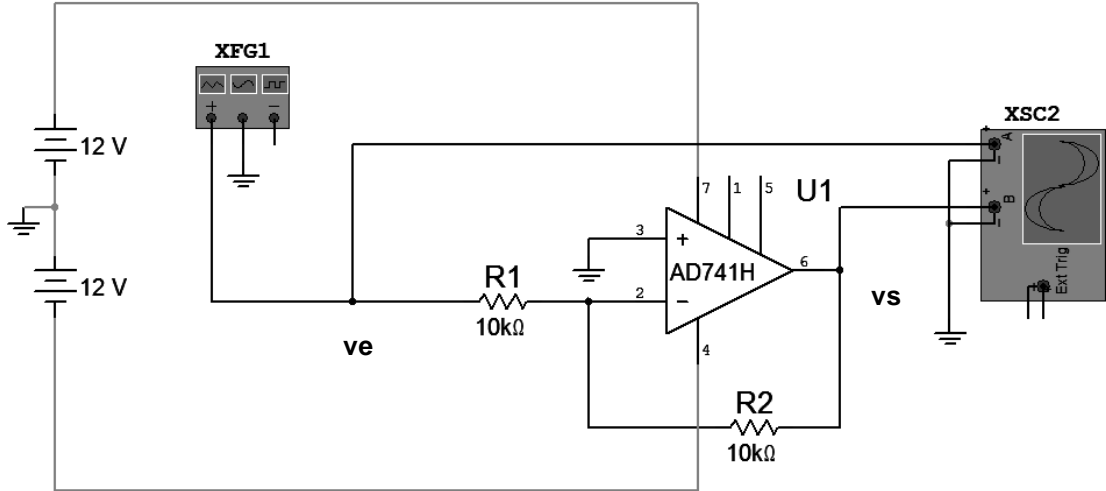
Experiência IV.2: Correntes de polarização de entrada.

1	<p>Teoria:</p> <p>Correntes de polarização: $I_{p1} = \frac{V_B}{100K\Omega}$ e $I_{p2} = \frac{V_A}{100K\Omega}$</p>
2	<p>Circuito:</p>  <p>2 x Fonte DC ajustável Multímetro AO 741 2 x 100KΩ - 1/4 W 1MΩ - 1/4 W.</p>
3	<p>Meça as tensões nos pontos A e B.</p>
5	<p>Calcule as correntes de polarização de entrada (I_{p1} e I_{p2}).</p>
6	<p>Calcule a média destas duas correntes: este é o valor normalmente informado pelo fabricante.</p>
7	<p>Compare o valor obtido com o equivalente ao fornecido pelo fabricante.</p>

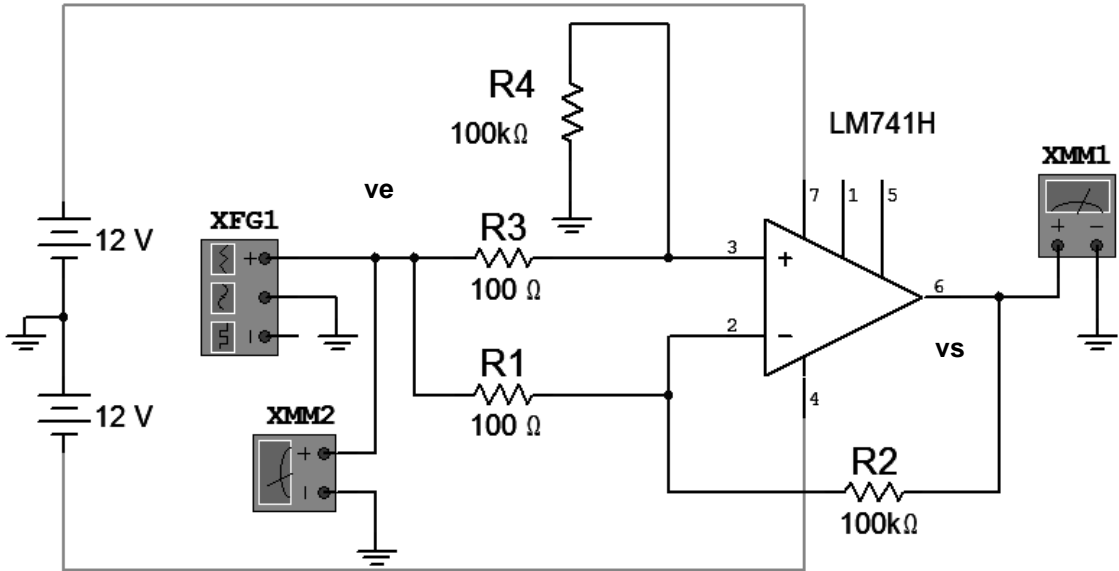
Experiência IV.3: Impedância intrínseca de entrada.

1	<p>Circuito:</p> <p>Osciloscópio duplo feixe Gerador de áudio 2 x Fonte DC ajustável Multímetro AO 741 potenciômetro R= 3M3Ω.</p>
2	Ajuste o gerador (ve) para as seguintes condições: 1Vpp, senoidal e frequência de 100Hz.
3	Varie o potenciômetro R, observando a tensão $v_{e'}$ até que se consiga a máxima redução sem distorção.
4	Meça a resistência de R e calcule a impedância de entrada do operacional R_i a partir da expressão $\frac{R_i}{R_i + R} = \frac{v_{e'}}{v_e}$.
5	Compare o valor obtido com o equivalente ao fornecido pelo fabricante.

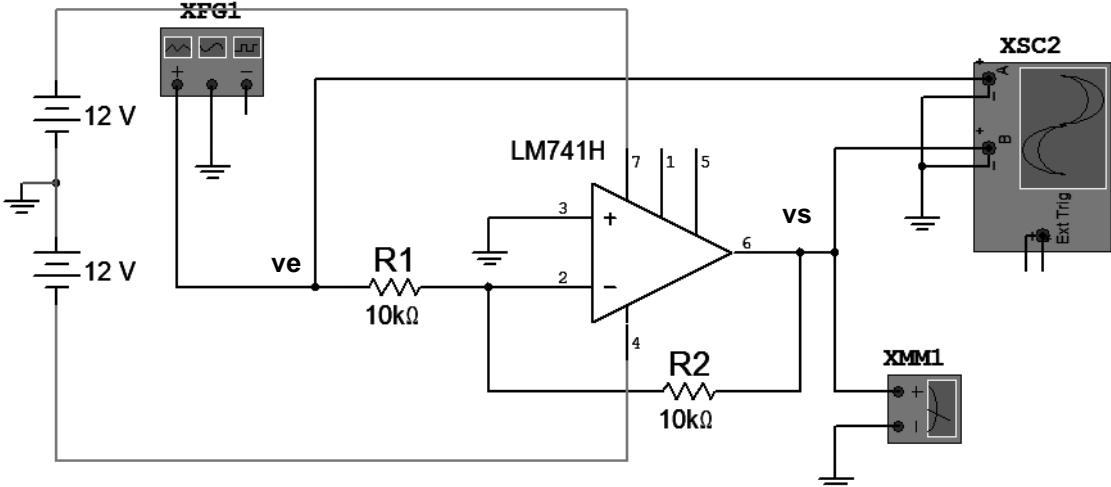
Experiência IV.4: Taxa de resposta (*slew rate*).

1	<p>Circuito:</p>  <p>Osciloscópio duplo feixe Gerador de áudio 2 x Fonte DC ajustável Multímetro AO 741 2x 10KΩ - 1/4 W.</p>
2	Ajuste o gerador (ve) para as seguintes condições: 1Vpp, forma de onda quadrada e frequência 5KHz.
3	Meça a tensão de saída (ΔV) em Vpp.
4	Meça o tempo necessário (Δt) para que a tensão de saída passe de seu valor máximo para o mínimo, ou o contrário.
5	Obtenha a razão de resposta $slew\ rate = \Delta V / \Delta t$
6	Compare o valor obtido com o equivalente ao fornecido pelo fabricante.

Experiência IV.5: Rejeição de modo comum (RRMC).

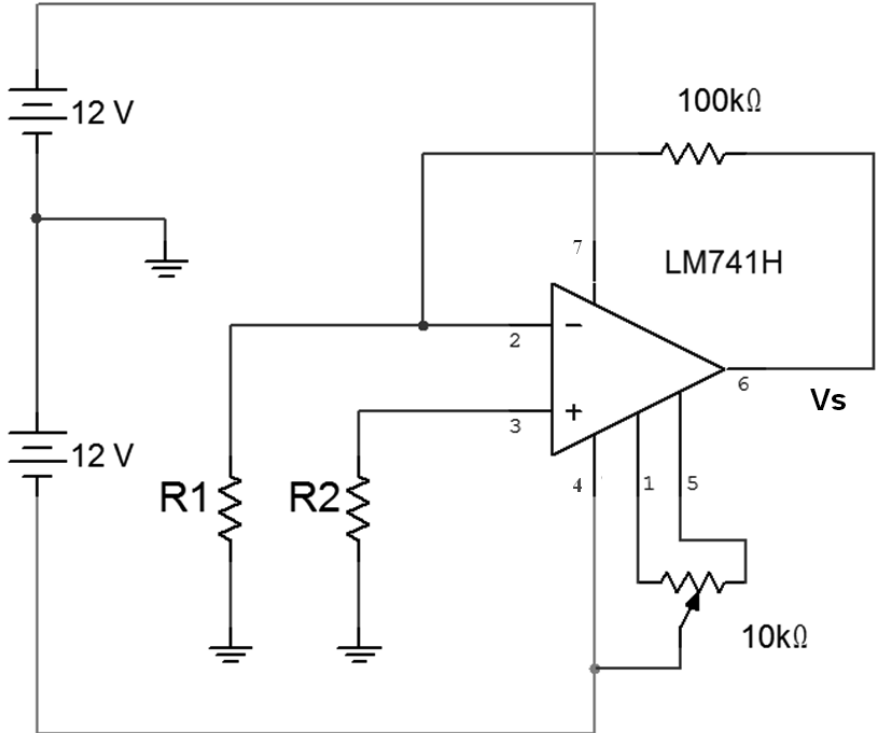
1	<p>Teoria:</p> <p>Ganho diferencial: $A_d = R_2 / R_1 = R_4 / R_3$</p> <p>Ganho em modo comum: $A_{me} = v_{smc} / v_{emc}$</p> <p>Razão de rejeição em modo comum: $RRMC \text{ (dB)} = 20 \log_{10} A_d / A_{me}$</p>
2	<p>Circuito:</p>  <p>Osciloscópio duplo feixe Gerador de áudio 2 x Fonte DC ajustável Multímetro AO 741 2x 100Ω - 1/4 W 2 x 100KΩ - 1/4 W.</p>
3	<p>Ajuste o gerador (v_{emc}) para as seguintes condições: 1Vpp, forma de onda senoidal e frequência 1KHz.</p>
5	<p>Meça a tensão AC de saída v_{smc} em Vpp (modo comum).</p>
6	<p>Calcule o ganho em modo comum (A_{mc}), usando a fórmula fornecida em (1).</p>
7	<p>O ganho A_d desse circuito, chamado amplificador diferencial (veja experiência V.3), é igual a $R_2/R_1 = 1000$. Determine a razão de rejeição em modo comum RRMC, usando a equação apresentada em (1).</p>

Experiência IV.6: Produto ganho-largura de faixa (banda) GB.

1	<p>Teoria: Produto ganho-largura de faixa: $GB = A_v \cdot B$ onde: $A_v = R_2 / R_1$</p> <p>Conhecendo-se frequência de corte superior (f_{cs}) e a frequência de corte inferior (f_{ci}) de um amplificador a sua banda (B) de passagem é definida como sendo igual $B = f_{cs} - f_{ci}$. No caso de um amplificador com OPAMP freqüentemente f_{ci} é igual a 0Hz (uma vez que o OPAMP responde a sinais de corrente continua) resultando em $B = f_{cs}$.</p> <p>Obs: a frequência de corte superior ocorre quando a tensão de saída “sofre um decréscimo de $1/\sqrt{2} \cong 0,7$”.</p>
2	<p>Circuito:</p>  <p>Osciloscópio duplo feixe Gerador de áudio 2 x Fonte DC ajustável Multímetro AO 741 2 x 10KΩ - 1/4 W.</p>
3	<p>Ajuste o gerador de sinais na seguinte condição: forma de onda senoidal, frequência de 1KHz e amplitude tal que tensão de saída v_s seja igual a 1,0Vp. Observe que o ganho deste amplificador foi fixado inicialmente como unitário.</p>
4	<p>Aumente a frequência de entrada até que a tensão de pico de saída se reduza para 0,7Vp. Meça a frequência neste ponto. Esta é a largura de faixa ($\equiv B$) do operacional, quando o ganho de tensão é unitário.</p>
5	<p>Multiplique a largura de faixa pelo ganho de tensão, para calcular o produto $GB = A_v \times B$, utilizando os valores obtidos na etapa 4.</p>

6	Repita os itens (4) e (5) para outros ganhos e verifique que produto GB é aproximadamente constante para diversos ganhos (altere R2 sendo $ A_v = R_2/R_1$):		
	A_v	B (Hz)	GB (Hz)
	1		
	2		
	10		

Experiência IV.7: Ajuste de *off-set*.

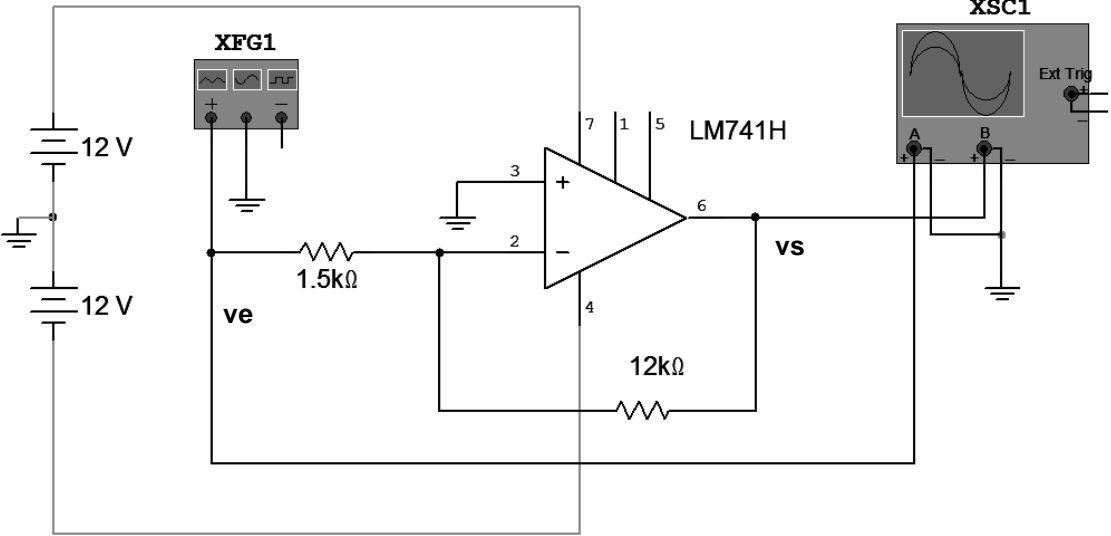
1	<p>Teoria:</p> <p>Em muitos circuitos com OPAMP quando a tensão de entrada é nula a tensão de saída idealmente também deverá ser nula.</p> <p>Embora nesta condição a tensão de saída normalmente assuma um valor baixo, em algumas aplicações deve-se garantir que ela seja o mais próximo de zero possível.</p> <p>As operações realizadas para cumprir este objetivo são denominadas de <i>off-set</i>.</p> <p>Utilizaremos o CI741 o qual dispõe de terminais para se fazer tal ajuste. Verificaremos também que o mínimo <i>off-set</i> ocorre quando as são iguais as impedâncias vistas pela entrada inversora e pela entrada não inversora.</p>
2	 <p>Osciloscópio duplo feixe Gerador de áudio 2 x Fonte DC ajustável Multímetro AO 741 2x 10KΩ - 1/4 W 100KΩ - 1/4 W potenciômetro de 10KΩ.</p>
3	Monte o circuito apresentado no item (2).
4	Para cada par de valores (R1, R2) da Tabela que se segue ajuste o potenciômetro de <i>offset</i> de modo que Vs atinja um mínimo. Anote nesta mesma Tabela os valores de Vs obtidos em cada caso.

R1 [K Ω]	R2 [K Ω]	Vs [V]
0	0	
10	0	
10	10	

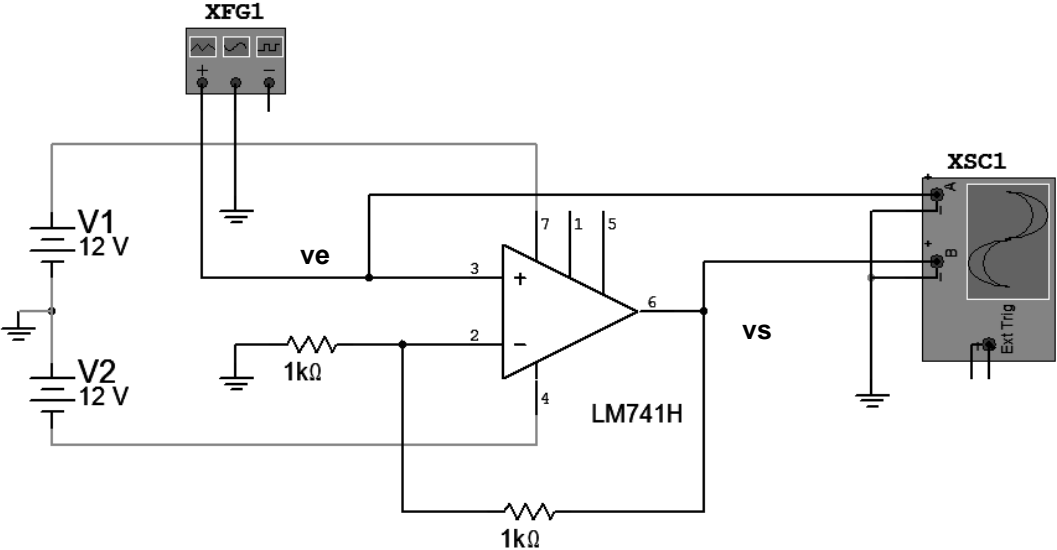
5 Em que condição ocorreu a menor tensão na saída (Vs)? Comente.

V. Circuitos lineares com AO

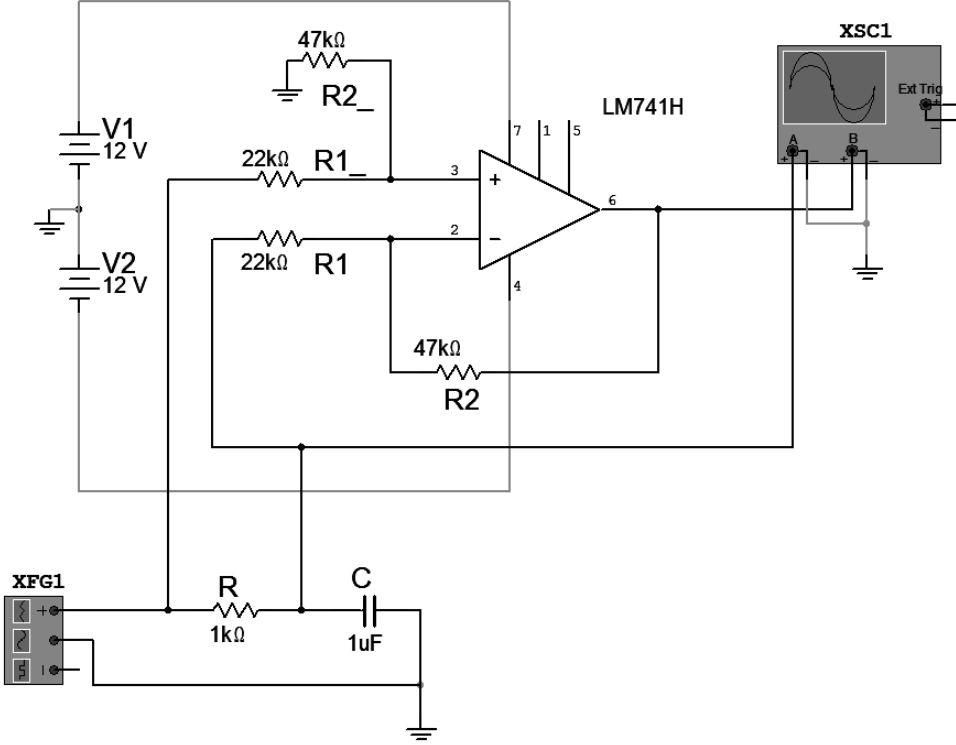
Experiência V.1: Amplificador inversor.

1	<p>Teoria: Veja [BOYLESTAD & NASHELSKY - 1996], seção 4.3.</p>
2	<p>Circuito:</p>  <p>Osciloscópio duplo feixe Gerador de áudio 2 x Fonte DC ajustável Multímetro AO 741 1K5Ω - 1/4 W 12KΩ - 1/4 W.</p>
3	<p>Aplique um sinal senoidal de 1Vp e frequência 1KHz e meça a tensão de saída em Vpp.</p>
4	<p>Calcule o ganho e compare com o valor teórico.</p>
5	<p>Repita os itens (3) e (4) para um sinal de frequência 10 KHz.</p>
6	<p>Registre o sinal de saída (forma de onda e amplitude) para um sinal de entrada definido por 1Vp de amplitude, forma de onda de onda quadrada e frequência de 1KHz.</p>
7	<p>Repita o item (6) mudando a frequência para 10 KHz.</p>
8	<p>Conecte um dos terminais de um resistor de 1KΩ na fonte de +12V e o outro terminal a um diodo de Si (tipo BAX17). Conecte o outro terminal do diodo ao terra.</p>
9	<p>Desconecte o gerador de áudio e aplique o sinal de CC de aproximadamente 0.6V (sobre o diodo descrito no item 8) na entrada ve do circuito.</p>
10	<p>Meça os sinais de entrada e de saída.</p>
11	<p>Com os valores medidos em (10) calcule o ganho e compare com o valor teórico.</p>

Experiência V.2: Amplificador não-inversor.

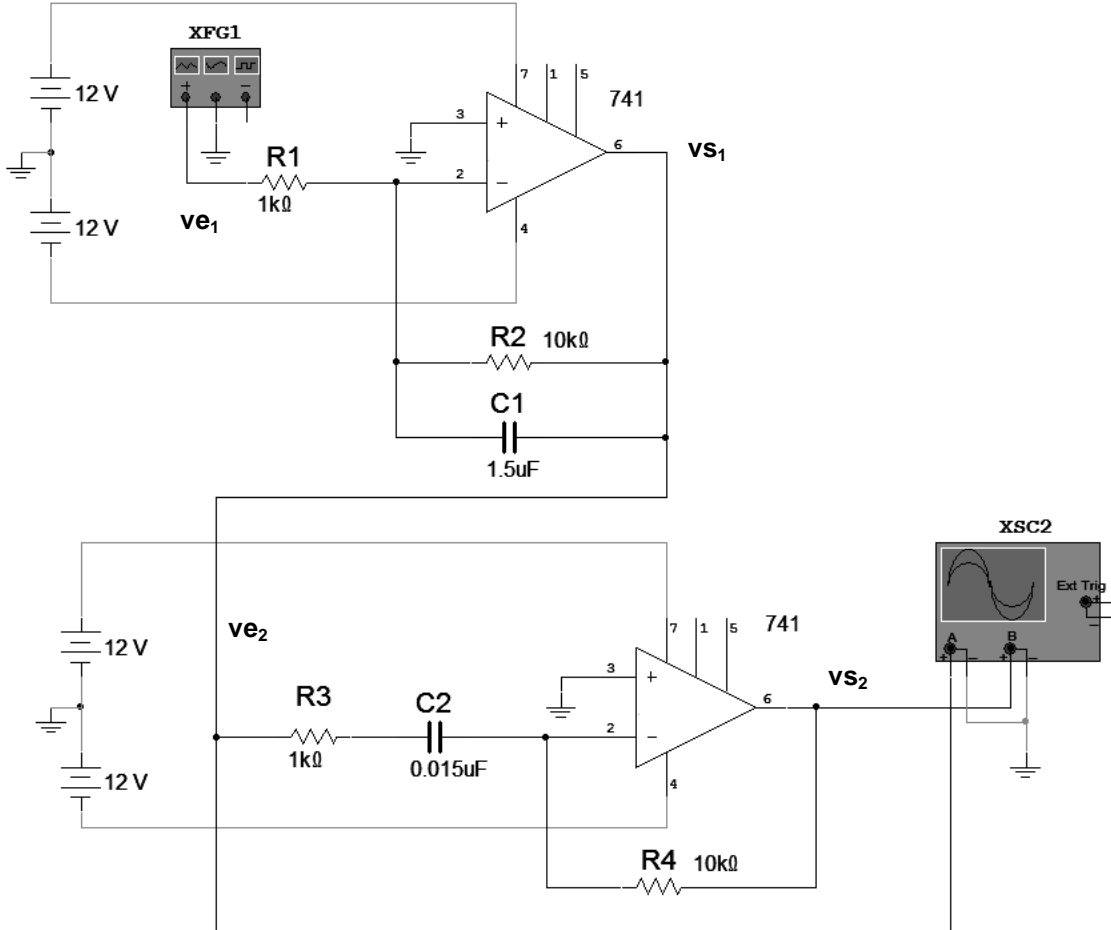
1	<p>Teoria: Veja [BOYLESTAD & NASHELSKY - 1996], seção 4.3.</p>
2	<p>Circuito:</p>  <p>Osciloscópio duplo feixe Gerador de áudio 2 x Fonte DC ajustável Multímetro AO 741 2 x 1KΩ - 1/4 W.</p>
3	<p>Aplique um sinal senoidal de 2Vpp e frequência 1KHz e meça a tensão de saída em Vpp.</p>
4	<p>Com os valores obtidos em (3) calcule o ganho e compare com o valor teórico.</p>
5	<p>Conecte um dos terminais de um resistor de 1KΩ na fonte de +12V e o outro terminal a um diodo de Si (tipo BAX17). Conecte o outro terminal do diodo ao terra.</p>
6	<p>Desconecte o gerador de áudio e aplique o sinal de CC de aproximadamente 0.6V (sobre o diodo descrito no item 5) na entrada não inversora do Operacional.</p>
7	<p>Meça os sinais de entrada e de saída.</p>
8	<p>Com os valores medidos em (7) calcule o ganho e compare com o valor teórico.</p>
9	<p>Aumente o sinal do gerador de áudio até que ocorra distorção do sinal de saída (isto é, até que a forma de onda do sinal de saída fique diferente da forma de onda do sinal de entrada).</p>
10	<p>Registre (foto ou desenho) a forma de onda do sinal de saída e explique por que ocorre esta distorção.</p>

Experiência V.3: Amplificador Diferencial.

1	<p>Objetivo: Geralmente num osciloscópio as entradas A e B são referidas a um terra comum e nestas condições para “ler” um sinal levantado do terra, como é o caso da tensão sobre o resistor R no circuito em (3), pode-se usar o circuito diferencial.</p>
2	<p>Teoria:</p> $V_s = \frac{R_2}{R_1} (v_2 - v_1)$
3	<p>Circuito:</p>  <p>Osciloscópio duplo feixe Gerador de áudio 2 x Fonte DC ajustável Multímetro AO 741 2 x 22KΩ - 1/4 W 2 x 47KΩ - 1/4 W 1KΩ - 1/4 W 1μF poliéster.</p>
4	<p>Ajuste o gerador para sinal senoidal de 1KHz e amplitude 1Vp.</p>
5	<p>Meça a defasagem entre os sinais dos canais A e B do osciloscópio. Este valor está de acordo com a Teoria? Explique.</p>
6	<p>Coloque o osciloscópio em varredura externa. Qual é a figura obtida. Varie a frequência do gerador de áudio e registre o comportamento da figura lida no osciloscópio. Explique.</p>

8	Volte o osciloscópio para varredura interna e altere para quadrada a forma de onda no gerador. Esta forma de onda é mantida ao longo do circuito RC? Explique.
9	Para um sinal senoidal, com frequência de 100Hz e usando Lissajours (varredura interna) bem como diretamente, meça a defasagem entre a tensão do gerador e a tensão sobre o capacitor. Compare o valor medido com o valor teórico esperado.

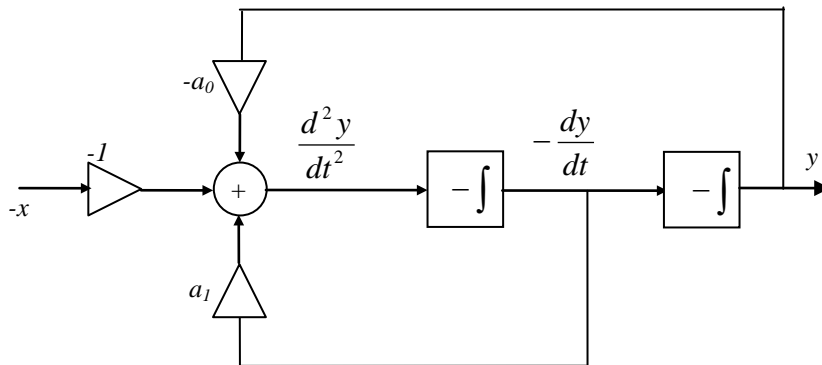
Experiência V.4: Integrador e Diferenciador.

1	<p>Teoria:</p> $R_1 C_1 \approx T_{\min}; \quad R_2 \approx 10R_1 \Rightarrow V_s \cong -\frac{1}{R_1 C_1} \int V_E(t) dt$ $R_3 C_2 \leq T/10; \quad R_4 \approx 10R_3 \Rightarrow V_s \cong -R_4 C_2 \frac{dV_E(t)}{dt}$
2	<p>Circuito:</p>  <p><i>Observação: devido à complexidade o circuito deve ser fornecido em placa de montagem.</i></p>
3	<p>Ajuste o sinal de entrada (ve_1) para tipo de onda quadrada, frequência 1KHz ($T= 1ms$) e amplitude 1Vp.</p>
4	<p>Meça o valor de pico a pico do sinal de saída vs_1 e registre a sua forma de onda.</p>

5	Meça o valor de pico a pico e registre a forma de onda do sinal de saída v_{s2} (coloque a entrada do canal B em acoplamento AC).
6	Compare os resultados obtidos em (4) e em (5) com os teoricamente esperados.
7	Repita os itens 4 e 5 alterando a frequência para 5KHz e para 50Hz.
8	Compare os resultados obtidos em (7) com os teoricamente esperados.
9	Ajuste o sinal de entrada (v_{e1}) para tipo de onda senoidal, frequência 1KHz ($T= 1ms$) e amplitude 1Vp.
10	Repita os itens (4) e (5). Explique as defasagens entre os sinais v_{e1} , v_{s1} e v_{s2} .
11	Usando Amplificadores Operacionais, desenhe os circuitos elétricos separados de um Integrador e de um Diferenciador ideais, isto é, com $R2= \infty$ e $R3= 0$ no circuito do item (2).

Experiência V.5: Computação Analógica.

Teoria:



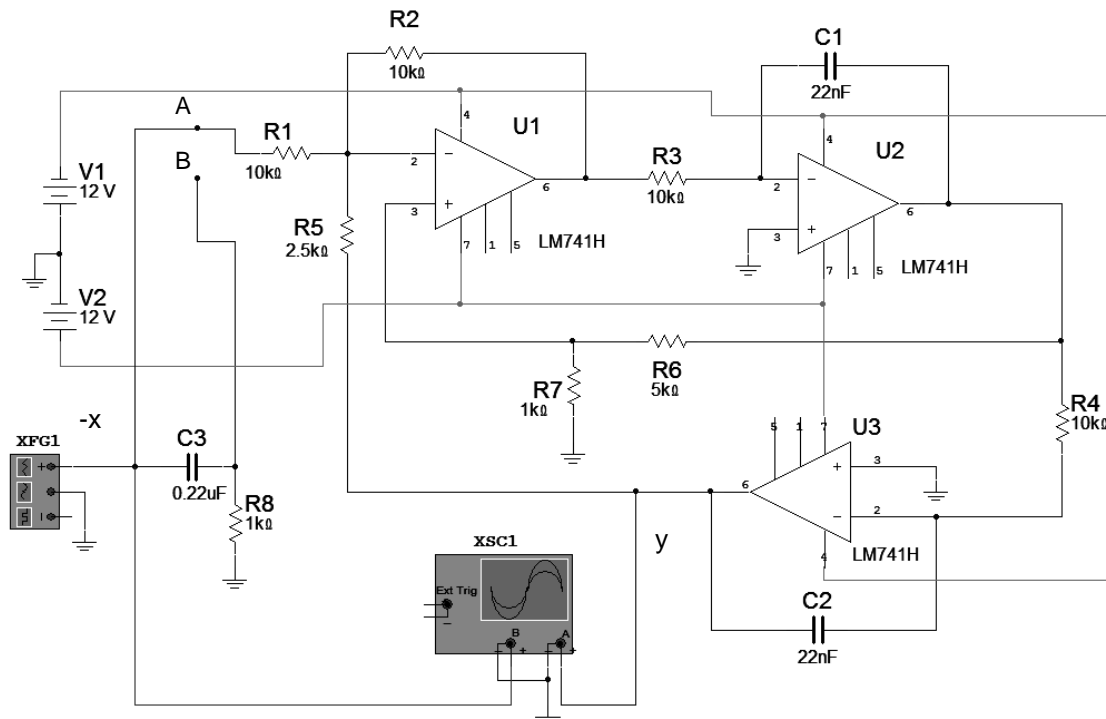
1

$$x - a_0 y - a_1 \frac{dy}{dt} = \frac{d^2 y}{dt^2} \Rightarrow \frac{d^2 y}{dt^2} + a_1 \frac{dy}{dt} + a_0 y = x; \text{ fazendo-se } a_0 = 2\xi\omega_n \text{ e } a_1 = \omega_n^2:$$

(1) $a_0 = 4$ e $a_1 = 1 \Rightarrow \xi = 0,25$ e $\omega_n = 2 \Rightarrow$ saída com sobre sinal de 40%.

(2) $a_0 = 1$ e $a_1 = 2 \Rightarrow \xi = 1$ e $\omega_n = 1 \Rightarrow$ saída com amortecimento crítico (sem oscilação).

Circuito:



2

Observação: devido à complexidade o circuito deve ser fornecido em placa de montagem.

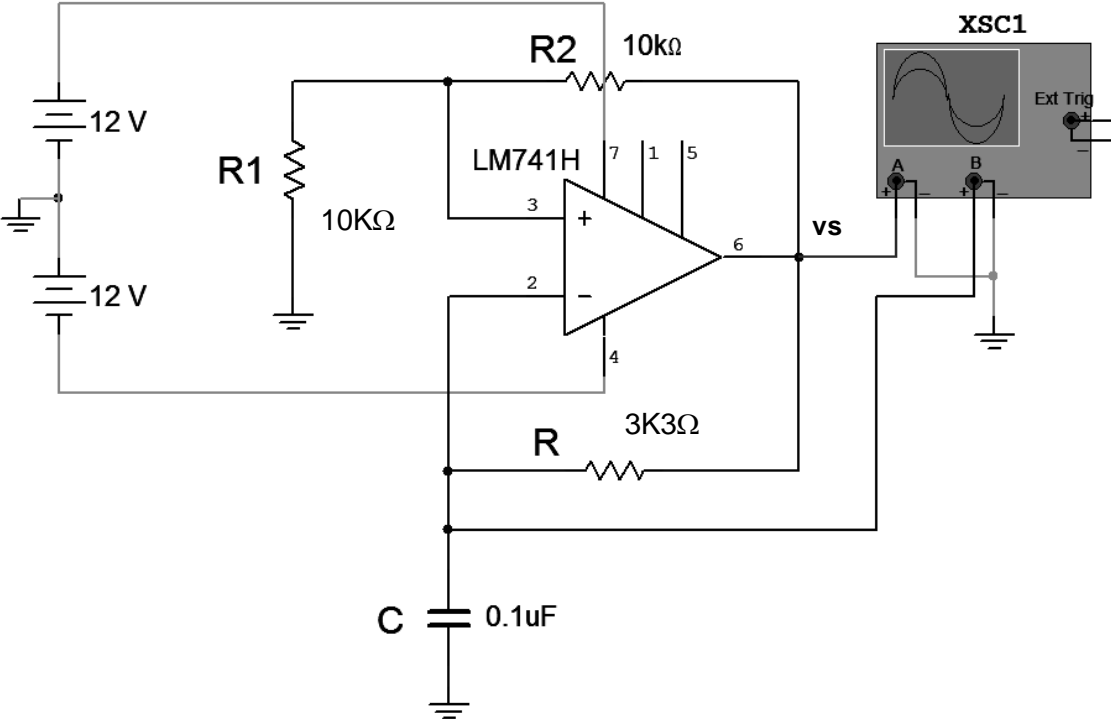
3

Alimente o circuito apresentado no item (2).

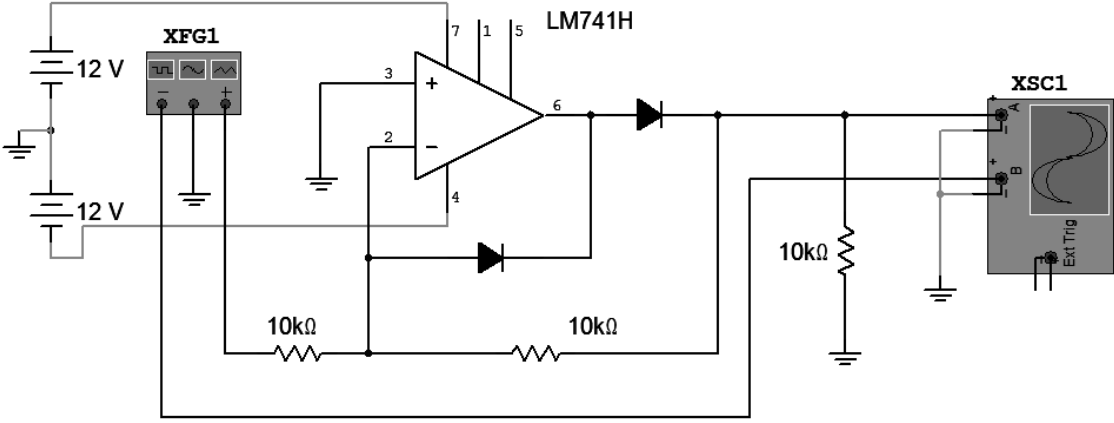
4	Ajuste o sinal de entrada para tipo de onda quadrada, frequência 100 Hz e amplitude 2V _p .
5	Meça os sinais de entrada e saída respectivamente -x (use o canal B do osciloscópio no modo invertido para este sinal) e y. Verifique que o sinal de saída y tem um sobresinal de 40% e que a frequência da oscilação é de aproximadamente 1400Hz. Obs: unidade de tempo = R3C1 = R4C2 = $10 \times 10^3 \times 22 \times 10^{-9} = 0.22\text{ms}$; $\omega_0=2$ $\Rightarrow f_0 = 2/(2\pi \times 0.22 \times 10^{-3}) = 1450\text{Hz}$ (\equiv período $\cong 0.7\text{ms}$)
6	Altere os seguintes resistores para: R5= R7= 10K Ω .
7	Meça os sinais de saída e entrada respectivamente -x (use o canal B do osciloscópio no modo invertido para este sinal) e y. Verifique que o sinal de saída y não tem oscilação.
8	Obtenha as equações diferenciais, isto é, os valores dos coeficientes a_1 e a_2 de $d^2y/dt^2 + a_1 dy/dt + a_0y = x$ nos seguintes casos: (i) circuito original do item (2) e (ii) para o circuito alterado de acordo com o item (6).
9	Volte os resistores alterados em (6) para os valores originais: R5= 2K5 Ω e R7= 1K Ω .
10	Altere a entrada do sistema (via R1) da saída do gerador para a tensão sobre o resistor R8 e transfira o canal B do osciloscópio para a saída de U1. Coloque a varredura do osciloscópio para externa e interprete a figura obtida.
11	Repita o item (10) colocando o canal B na saída de U2.

VI. Circuitos não lineares com AO

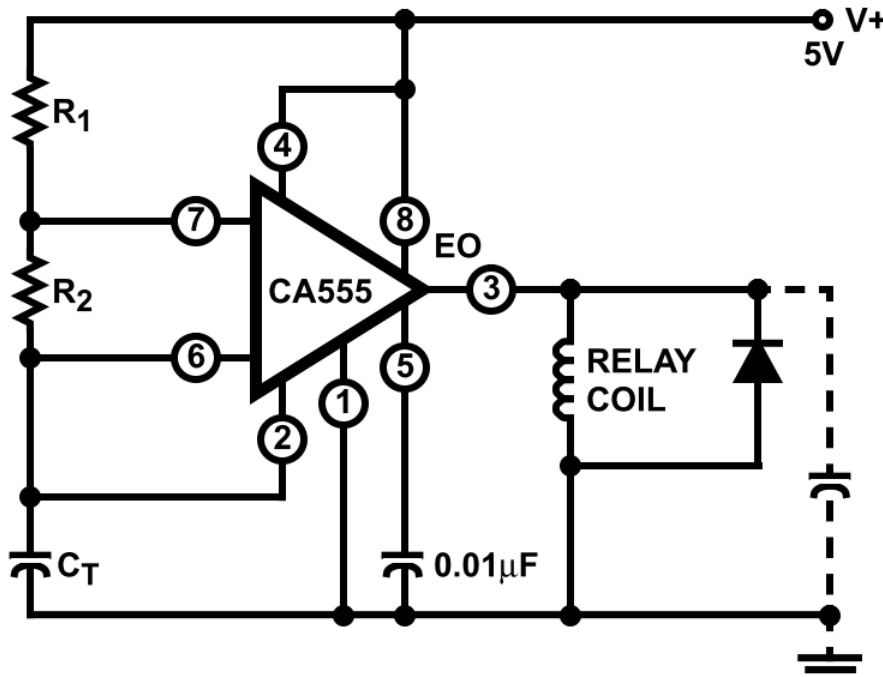
Experiência VI.1: Smith Trigger/ Multivibrador Astável.

1	<p>Teoria: Seção 14.7 de [BOGART - 2001] e/ou 7.4.3 de [CIPELLI & MARKUS & SANDRINI - 2007].</p> $f_o = \frac{1}{2RC \ln\left(\frac{2R_1}{R_2} + 1\right)}$
2	<p>Circuito:</p>  <p>Osciloscópio duplo feixe Gerador de áudio 2 x Fonte DC ajustável Multímetro AO 741 2 x 10KΩ - 1/4 W 3K3Ω - 1/4 W 0.1μF poliéster.</p>
3	Deduz a expressão da frequência de oscilação.
4	Registre as formas de onda da tensão no capacitor e da tensão de saída.
5	Meça a frequência do sinal de saída e compare com valor teórico.
6	Coloque a varredura do osciloscópio para externa e interprete a Figura obtida.

Experiência VI.2: Retificação de precisão.

1	Teoria: Seção 14.8 de [BOGART - 2001].
2	<p>Circuito:</p>  <p>Osciloscópio duplo feixe Gerador de áudio 2 x Fonte DC ajustável Multímetro AO 741 3 x 10KΩ - 1/4 W 2 x diodo de sinal.</p>
3	Monte o circuito apresentado no item (2).
4	Ajuste o gerador para os seguintes valores: 1V _{pp} , senoidal e frequência de 1Khz.
3	Verifique, pelos canais A e B do osciloscópio, que na saída retificada (tensão sobre o resistor R3) não ocorre a perda de 0,7V relacionada à junção PN do retificador de Si.

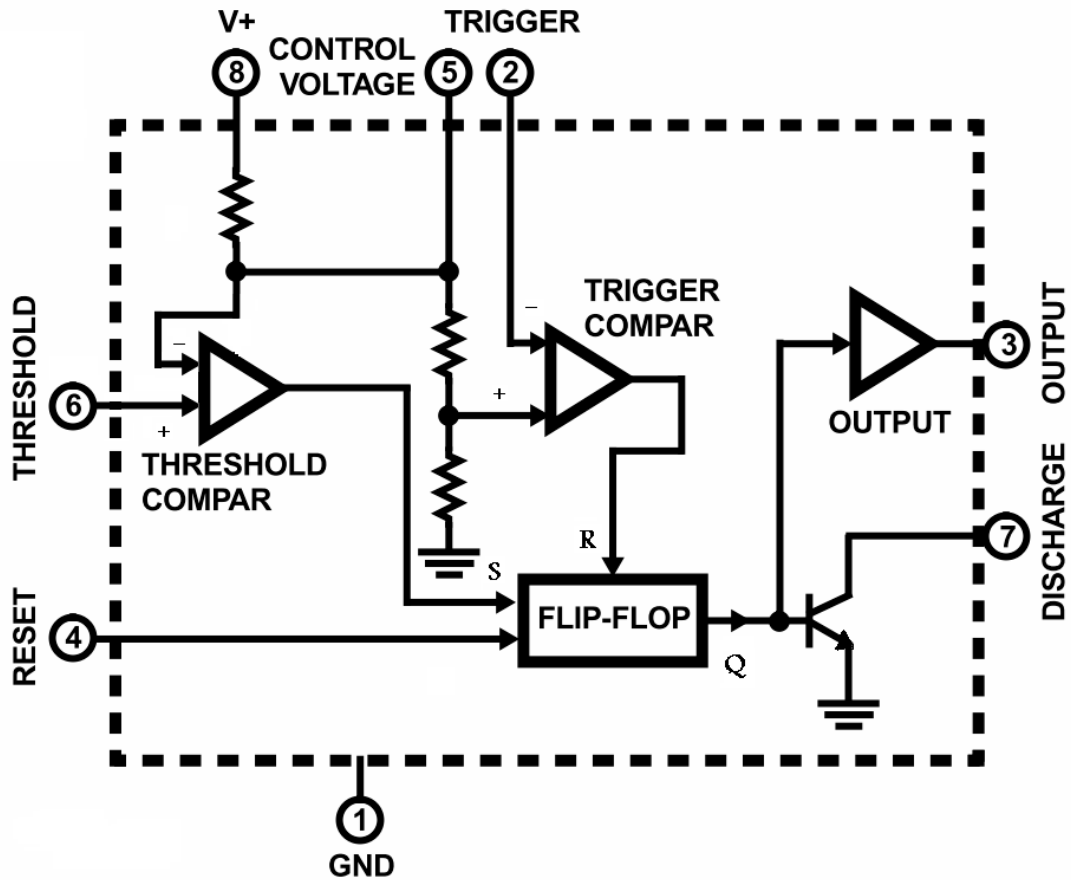
Experiência VI.3: Astável com 555.

1	Teoria: Seção 7.6.1 de [CIPELLI & MARKUS & SANDRINI - 2007].
2	 <p>Osciloscópio duplo feixe Gerador de áudio Fonte DC ajustável Multímetro R1= 2K2Ω - 1/4 W R2= 2K2Ω - 1/4 W CT= 0.470 µF poliéster.</p>
3	Monte o circuito do item (2) (desconsidere o relé usado como carga).
4	<p>Calcule a frequência esperada nas condições deste circuito, ver [CIPELLI & MARKUS & SANDRINI – 2007]:</p> $f_{osc} = \frac{1.44}{(R_1 + 2R_2)C_T}$
5	Meça a frequência na saída do circuito do item (2), pino 3, e compare com o valor calculado no item (4).
6	Registre os sinais na saída do circuito e sobre o capacitor CT.

Explique os gráficos dos sinais obtidos no item (6)

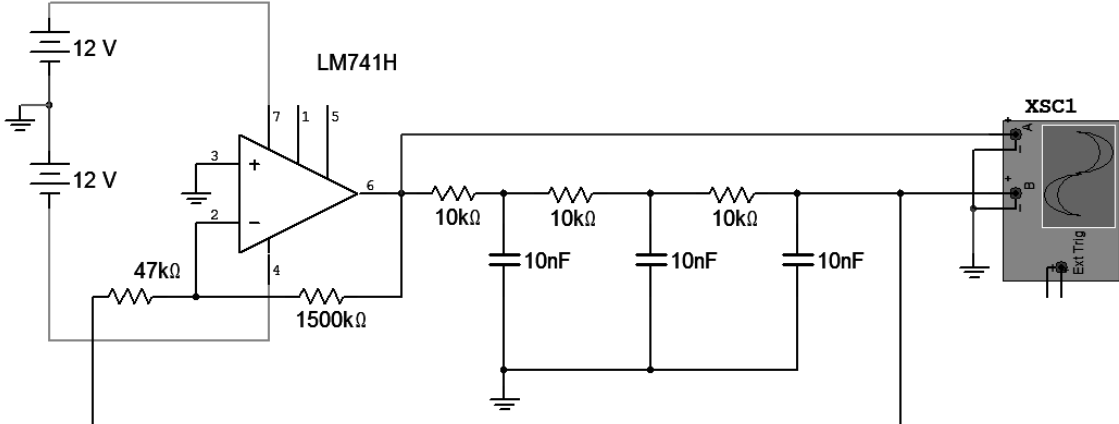
Dica: Considere um circuito interno do CI555, como por exemplo o apresentado abaixo, para descrever como os sinais são gerados, ver [CIPELLI & MARKUS & SANDRINI – 2007]:

7

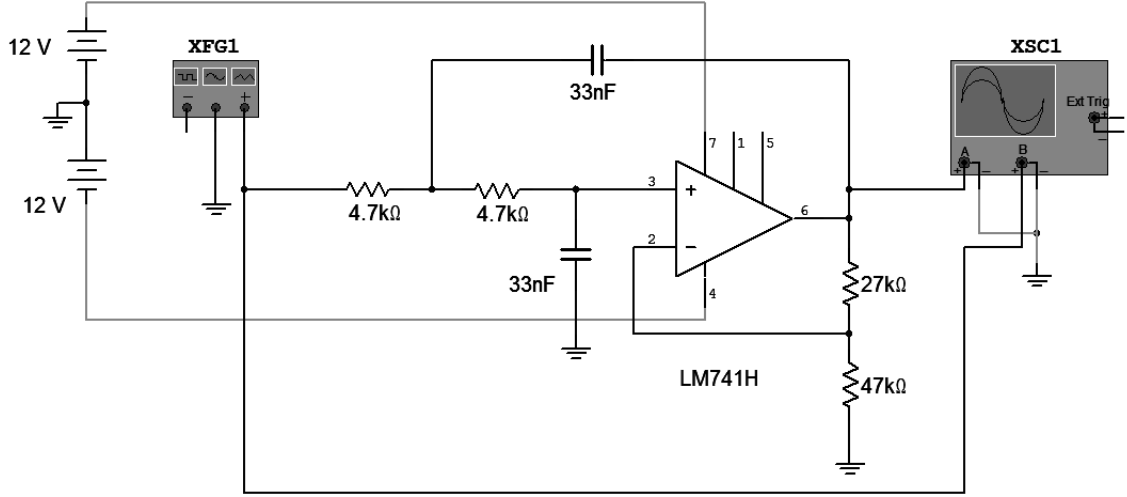


VII. Osciladores e Filtros

Experiência VII.1: Oscilador por deslocamento de fase.

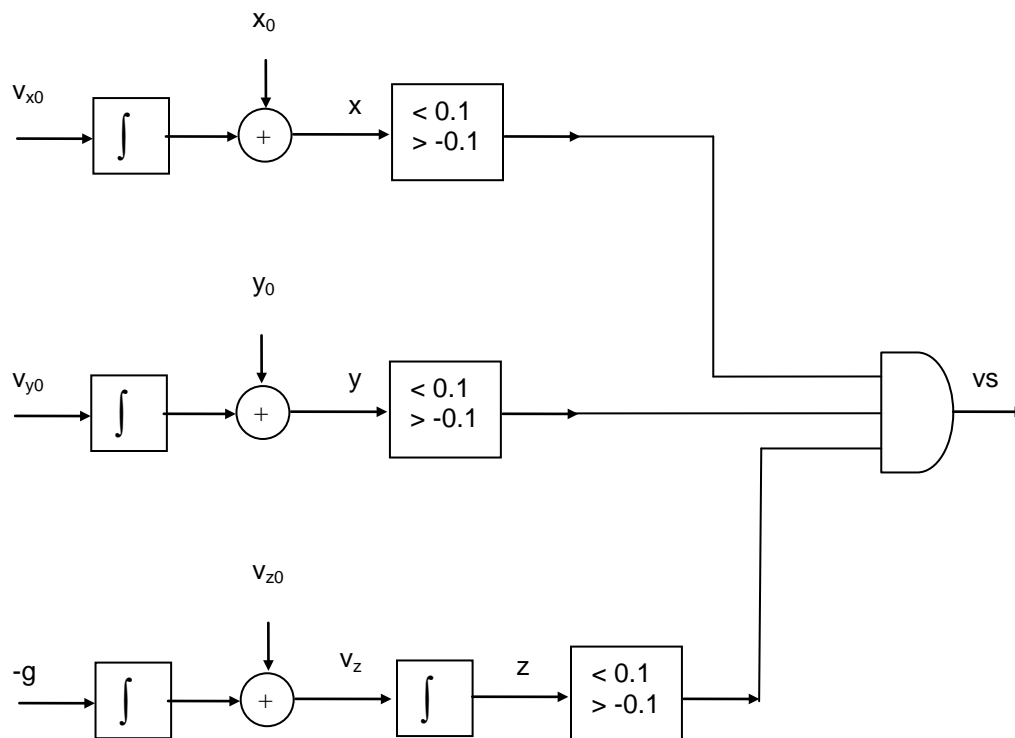
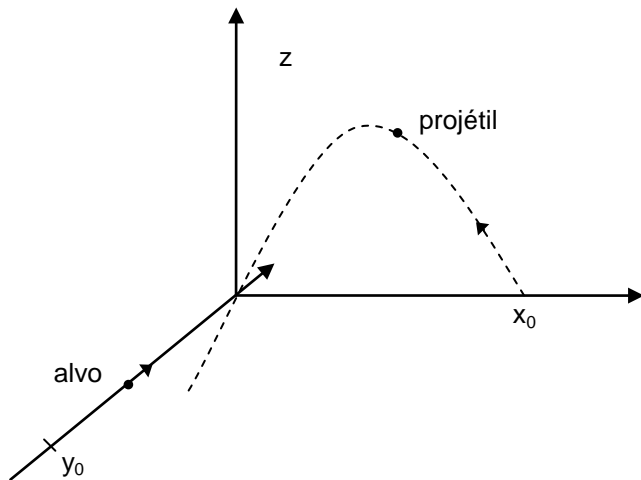
1	<p>Teoria: Seção 14.5 de [BOGART - 2001] e/ou 18.6 de [BOYLESTAD & NASHESKY - 1996].</p> $f_o = \frac{\sqrt{6}}{2\pi RC}$ com R e C sendo os valores dos resistores e capacitores empregados no filtro defasador.
2	<p>Circuito:</p>  <p><i>Observação: devido à complexidade o circuito deve ser fornecido em placa de montagem.</i></p>
3	Deduz a expressão da frequência de oscilação.
4	Meça a frequência do sinal de saída e compare com valor teórico.
5	Altere o resistor de 1M5Ω para 1MΩ e verifique se continua ocorrendo oscilação. Explique o resultado encontrado.

Experiência VII.2: Filtro passa-baixas.

1	Teoria: Ver seção 14.7 de [BOGART - 2001] e seção [PERTENCE JR - 2003].
2	<p>Circuito:</p>  <p><i>Observação: devido à complexidade o circuito deve ser fornecido em placa de montagem.</i></p>
2	Calcule a frequência de corte f_c . Com um sinal senoidal de 1Vp na entrada do filtro, apresentado no item (2), varie sua frequência de 100Hz a 2KHz e verifique a atuação do filtro.
3	Meça a resposta em frequência do filtro: veja a experiência I.3.
4	Compare os valores da frequência de corte e do ganho medidos com os esperados.
5	Injete um sinal de onda quadrada de 1Vp e ajuste sua frequência para que o sinal de saída seja senoidal com baixa distorção. Explique o resultado encontrado.

Apêndice 1: Computador Analógico aplicado a Balística

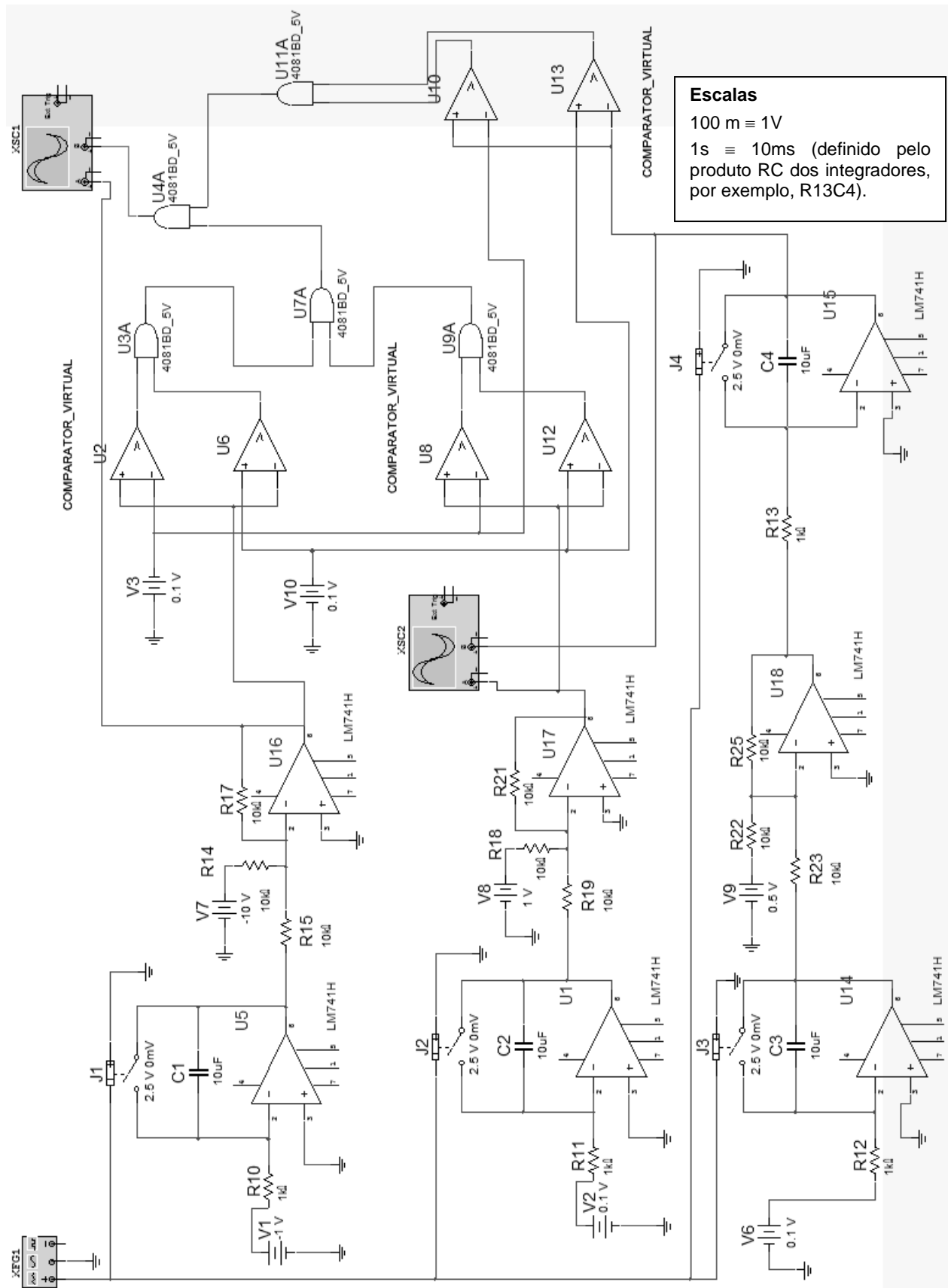
Solução do problema usando as equações do movimento (sem atrito e sem vento):



O circuito que implementa esta solução é apresentado na página seguinte. O gerador de sinais foi ajustado para fornecer uma onda quadrada de amplitude 5Vpp e frequência 3Hz.

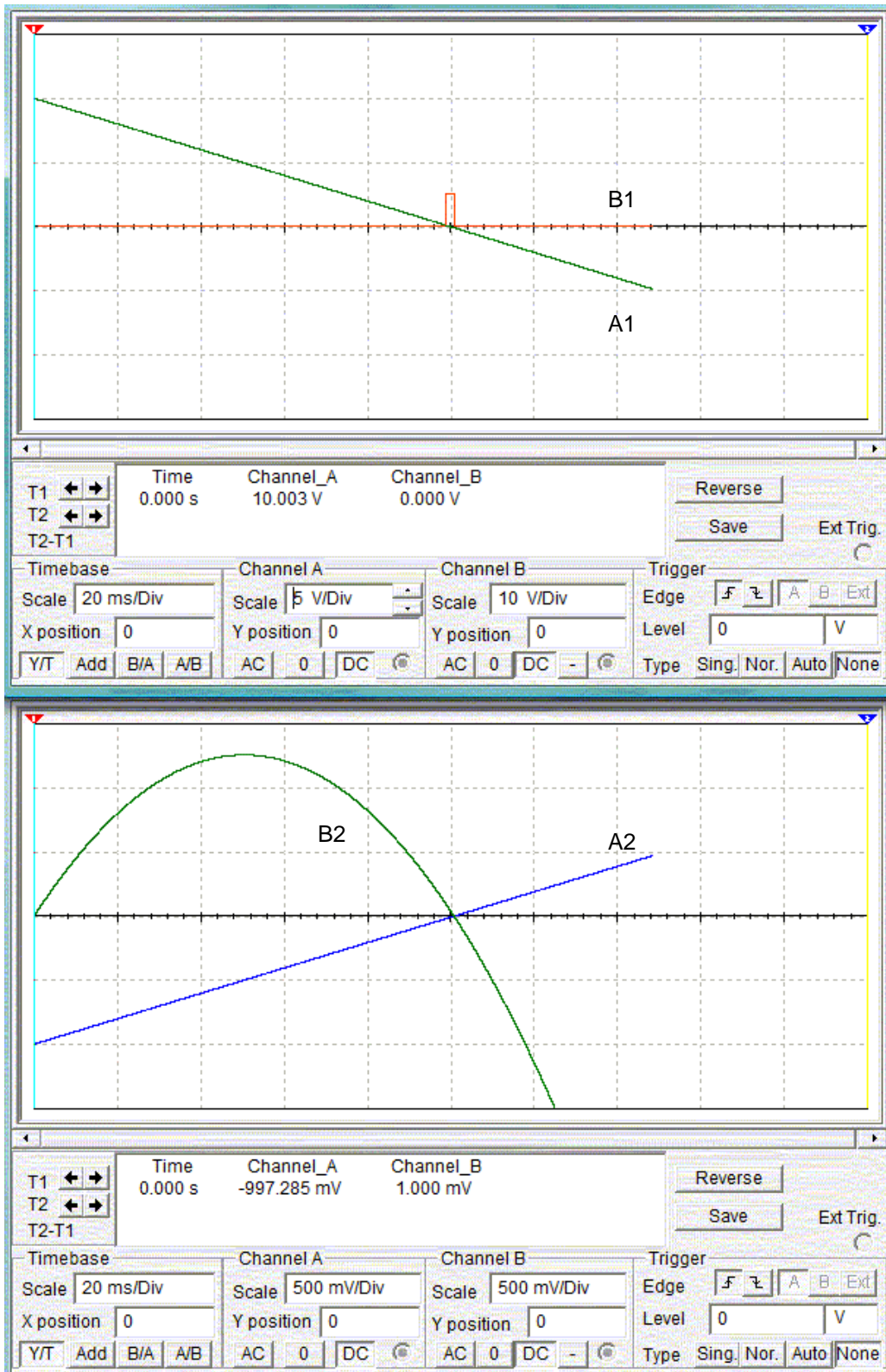
Identifique as tensões correspondentes às grandezas g (aceleração da gravidade), x_0 , y_0 , v_{x0} , v_{y0} e v_{z0} .

Dados x_0 , y_0 e v_{y0} ajustam-se v_{x0} e v_{z0} para que ocorra um pulso na saída v_s . O par (v_{x0}, v_{z0}) obtido nestas condições consiste na solução procurada.



Escalas
 100 mV \equiv 1V
 1s \equiv 10ms (definido pelo produto RC dos integradores, por exemplo, R13C4).

Um exemplo de resultado positivo é apresentado nas Figuras seguintes. Ele foi obtido se implementado o circuito proposto no simulador MULTISIM.



BIBLIOGRAFIA

[BERLIN - 1977] – BERLIN H. M. Projetos com Amplificadores Operacionais. Editele, 2ª ed, 1977.

[BOGART - 2001] – BOGART T. F. Dispositivos e Circuitos Eletrônicos, v2. Makron *Books* Ltda, 2001.

[BOYLESTAD & NASHELSKY - 1996] – BOYLESTAD R.L. e NASHELSKY L. Dispositivos Eletrônicos. Prentice Hall, 6ª ed, 1996.

[CARVALHO – 2002] - CARVALHO R. M. M. Apostila de Laboratório de Eletrônica III e IV. UNIP, 2002.

[CIPELLI & MARKUS & SANDRINI - 2007] – CIPELLI A. M. e MARKUS O. e SANDRINI W. Teoria e Desenvolvimento de projetos de Circuitos Eletrônicos. Editora Érica Ltda, 23ª ed, 2007.

[MALVINO - 1992] – MALVINO A. P. Eletrônica no Laboratório. Editora McGraw-Hill Ltda, 3ª ed, 1992.

[PERTENCE JR - 2003] – PERTENCE JR A. Amplificadores Operacionais e Filtros Ativos. Artmed Editora, 6ª ed, 2003.