



**ESCOLA POLITÉCNICA DA USP
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECATRÔNICA E DE SISTEMAS MECÂNICOS**

APOSTILA

Laboratório de Eletrônica Analógica para Mecatrônica

PMR3308

© Universidade de São Paulo

Versão: 2017

Introdução

A disciplina PMR3308, Eletrônica Analógica para Mecatrônica, tem como objetivo fornecer subsídios para que os alunos do curso de Eng. Mecatrônica da EPUSP adquiram noções básicas de circuitos eletrônicos analógicos.

A conclusão do presente material só foi possível graças à participação – direta ou indireta – de diversos professores e funcionários relacionados ao curso de Mecatrônica: *Fabio G. Cozman, Lucas A. Moscato, Silvio Szafir, Antônio Fernando Maiorquim, Celso Furukawa, Diolino J. Santos F^o, Marcelo G. Simões, Pai Chi Nan.*

Certas informações e marcas registradas, apresentadas nesta apostila, são de responsabilidade e propriedade de seus respectivos proprietários e/ou fabricantes. Este material poderá ser livremente copiado para uso nas aulas de laboratório da disciplina PMR3308. Porém, é expressamente proibida a cópia deste material sob qualquer forma, para outros fins que não o exposto acima, sem prévia autorização.

Estrutura do curso

A metodologia de trabalho adotada para as aulas é a seguinte:

1. No início de cada aula é dada uma introdução teórica onde o professor elucida quais serão as atividades conduzidas na aula.
2. Uma vez realizada a experiência, o grupo deverá fazer o relatório correspondente – de forma objetiva – contendo uma parte teórica e uma parte de discussão dos dados experimentais obtidos. Não copie a apostila! Com relação à parte experimental, os resultados devem ser comentados detalhadamente com base na teoria correlata. Resultados não interpretados dificultam a avaliação!
3. O aluno deverá entregar o relatório sempre na aula posterior à experiência.

A média final (MF) será obtida combinando a média dos relatórios com nota de prova. A seguinte sequência de experiências deverá ser cumprida no laboratório. Note que não ocorre aula de laboratório em toda semana seguida.

- Exp. 1: Familiarização com equipamentos, teorema de Thevenin
- Exp. 2: Circuitos retificadores com diodos
- Exp. 3: Transistor como amplificador, como chave e em reguladores
- Exp. 4: Circuitos básicos com amplificadores operacionais
- Exp. 5: Osciladores

Procedimentos de laboratório

Ao utilizar os instrumentos do laboratório, seja cuidadoso. Em primeiro lugar, é necessário agir sempre com segurança:

- Antes de manipular qualquer circuito, certifique-se de que a **fonte de alimentação está desligada**.
- Uma vez implementado um determinado circuito, verifique se a polarização de todos os componentes está correta para evitar danos que podem prejudicar o andamento da experiência.
- Use cabos de alimentação de cores diferentes e verifique sempre se não estão invertidos! Na dúvida, meça a saída da fonte com o multímetro antes de conectar.
- Alinhe os pinos dos CIs nos soquetes e insira-os com cuidado, para não entortá-los.
- Se seu circuito não está funcionando, e você conseguiu convencer o professor de que o CI está pifado, não o guarde de volta. Entregue-o ao professor.

Verifique se sua bancada está em ordem e limpa, antes e depois do experimento. Entre outras coisas, ela deve conter os equipamentos. A princípio, devem estar identificados com o mesmo número da bancada – de 1 a 10. No entanto você pode encontrar itens sobressalentes com identificação fora dessa faixa, indicando que o original da bancada pode estar em manutenção.

Cada grupo é responsável pelos equipamentos disponíveis na sua bancada. Se algum equipamento não estiver operando em virtude de uso incorreto, a responsabilidade é da equipe que os estiver manuseando. Há uma série de manuais, dos fabricantes dos equipamentos, que estão disponíveis para consulta durante a aula de laboratório. Comunique qualquer problema ao professor e preencha o formulário de Comunicação de Defeito, disponível no laboratório. Equipamentos com defeito devem ser deixados na própria bancada. Cabos, cabinhos e outros acessórios que se danificarem devem ser entregues ao professor, juntamente com a Comunicação de Defeito preenchida.

Não pegue algo de outra bancada sem a autorização do professor. Caso seja autorizado, devolva à bancada de origem no final da experiência.

Experiência 1: Familiarização com os equipamentos

Placa de Experimentos (Protoboard)

Um protoboard (Figura 1a) é uma placa plástica com trilhas condutoras horizontais que conectam 5 furos entre si e trilhas condutoras verticais que cruzam toda a extensão da placa (Figura 1b). Nessa placa podem ser encaixados circuitos integrados e componentes discretos para a realização de testes iniciais de circuitos eletrônicos.

O protoboard disponível no laboratório contém bornes coloridos para a conexão de sinais externos de alimentação via cabos com conector do tipo “pino banana”. Os circuitos integrados que utilizam encapsulamento DIP (Dual In Package) devem ser encaixados nos pinos do protoboard na direção vertical. Outros tipos de componentes podem ser colocados em qualquer posição, com o devido cuidado de usar, para cada terminal, trilhas horizontais adjacentes ou trilhas horizontais em metades diferentes.

Atenção !

Entendam bem quais são os pinos conectados no protoboard, para evitar curtos-circuitos! Notem que as trilhas verticais finas estão totalmente conectadas.

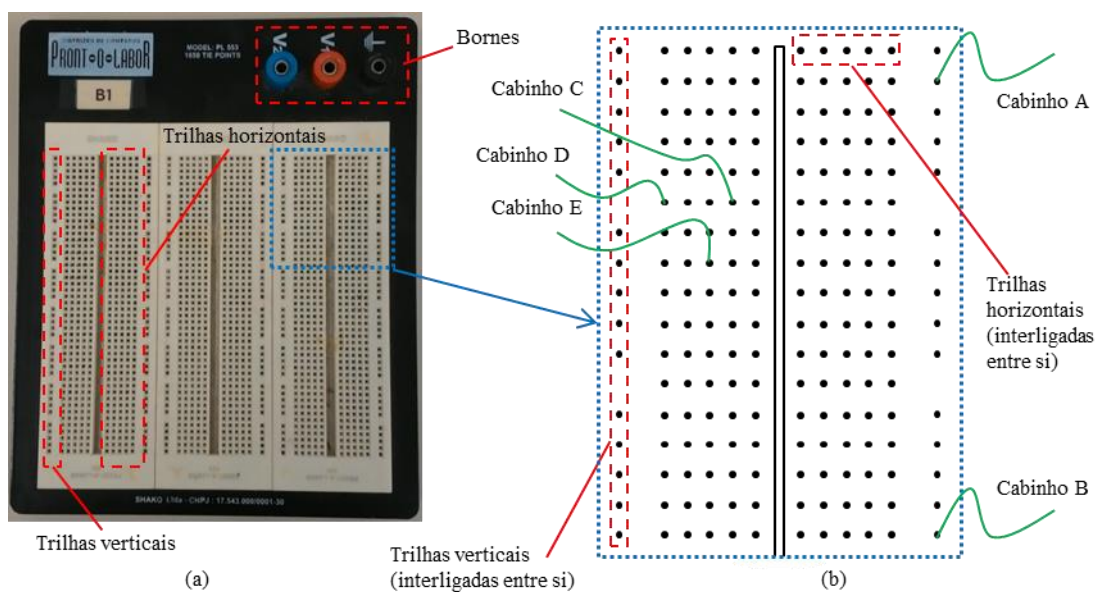


Figura 1 – (a) Fotografia do protoboard utilizado e (b) esquema das ligações no protoboard

As colunas laterais são destinadas a sinais de alimentação e sinais de entrada e saída.

Os bornes, localizados no canto superior direito do protoboard, existem para serem ligados à fonte de alimentação ou a alguma fonte de sinal. **Os bornes não estão conectados com as trilhas.** É preciso o uso de **cabinhos** para ligar os bornes às trilhas. **Não usar jumpers para ligar bornes às trilhas, para não danificar os jumpers.**

Multímetro

O multímetro é um instrumento de laboratório voltado à medição de tensões, correntes, resistências (em alguns casos, medições de frequência, capacitância, teste de diodo, teste de transistor). Tensões e correntes podem ser medidas tanto em valor contínuo (CC) como em alternado (CA).

Basicamente, há dois tipos de multímetros: os multímetros eletrônicos que contém elementos ativos e os multímetros contendo simplesmente elementos passivos. A grande diferença entre os dois é a impedância de entrada (que é muito maior no eletrônico, da **ordem de dezenas de MΩ**). Por sua vez, os multímetros eletrônicos podem ser analógicos, isto é, são monitorados através de um ponteiro, ou digitais, apresentando a leitura num display numérico.

Os multímetros em geral são calibrados para mostrar valores eficazes de formas de ondas senoidais (quando utilizados para medidas de valores alternados, CA). A medição de outras formas de onda produzirá valores que não representam o

valor eficaz da grandeza, e neste caso devem ser corrigidos pelo chamado *fator de forma*. **Em geral sinais variáveis devem ser medidos com osciloscópio, discutido adiante.**



Figura 2 – Multímetro Minipa ET-2060

O multímetro disponível no laboratório é do tipo digital (vide Figura 2), com uma chave seletora para escalas e funções. Note que existe uma posição para teste de diodos e transistores: se a junção semicondutora de um diodo ou transistor estiver funcionando, a leitura no mostrador será aproximadamente 0,7 volt quando polarizado diretamente.

Atividade 1

- Montar os 5 cabinhos “A a E” no protoboard de acordo com a Figura 1b. Podem ser montados em qualquer local do protoboard, desde que os cabinhos A e B estejam na mesma trilha vertical, cabinhos C e D na mesma trilha horizontal, e o cabinho E num outro lugar.
- 1.1 Usar a função de teste de continuidade para identificar os cabinhos que possuem o mesmo potencial elétrico.

Resistores

Os valores de resistência são indicados por um código de cores adotado por todos os fabricantes. Esse código usa bandas coloridas marcadas no corpo do resistor. As cores e seus valores numéricos são mostrados na Tabela 1. Esse código é usado para resistores de potências 1/8 W, 1/4 W, 1/2 W, 1 W, 2 W e 3 W.

Tabela 1: Código de Cores para Resistores

cor	algarismos significativos	Multiplicador	Tolerância (%)
preto	0	1	
marrom	1	10	1
vermelho	2	100	2
laranja	3	1.000	
amarelo	4	10.000	
verde	5	100.000	
azul	6	10 ⁶	
violeta	7	10 ⁷	
cinza	8	10 ⁸	
branco	9	10 ⁹	
prata		0,01	10
ouro		0,1	5
sem cor			20

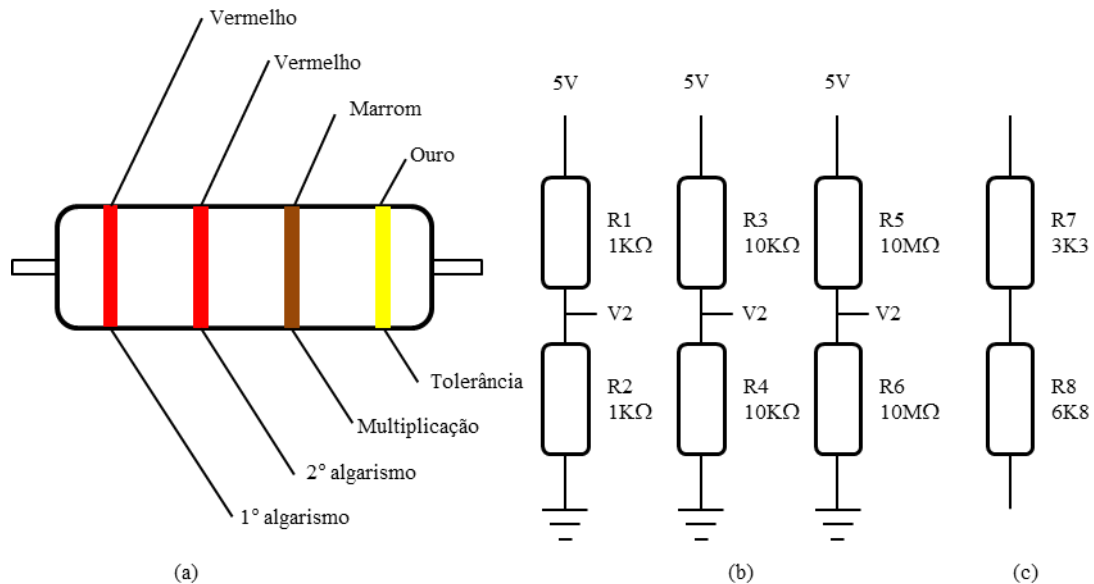


Figura 3 – (a) Resistor típico e (b) esquema de ligações para teste de Teorema de Thevenin, (c) esquema de ligação para verificação de erro

Um resistor típico é mostrado na Figura 3a, com uma representação do código de cores.

- A cor da primeira banda representa o valor do algarismo mais significativo.
- A cor da segunda banda representa o valor do segundo algarismo.
- A cor da terceira banda representa o valor do fator de multiplicação, isto é, o número de zeros a serem adicionados aos outros dois algarismos.
- A quarta banda é usada para designar a tolerância do resistor, que pode ser 5% (ouro) ou 10% (prata).

O resistor exemplificado na Figura 3a possui o seguinte código de cores: vermelho, vermelho, marrom, ouro. Portanto o seu valor seria 220Ω , com 5% de tolerância.

Existem ainda resistores de precisão com mais um algarismo significativo, isto é, esses resistores possuem uma banda adicional, com três bandas para os algarismos, uma banda para o fator multiplicador e uma banda para a tolerância. Nessa banda de tolerância as cores usadas são o marrom para 1% e o vermelho para 2%.

Os resistores disponíveis comercialmente são restritos a alguns valores padrões. Por exemplo, os valores padrão para resistores de 10% são múltiplos de: 1, 1.2, 1.5, 1.8, 2.2, 2.7, 3.3, 3.9, 4.7, 5.6, 6.8, 8.2.

Os resistores disponíveis são fabricados a partir de processos adequados para atender aos requisitos de precisão e estabilidade como a temperatura e potência dissipada.

Resistores de carbono, para uso geral, são fabricados a partir de um processo de deposição de um filme de carbono sobre um corpo de cerâmica e recoberto por um verniz para proteção elétrica e climática. São encontrados com tolerâncias que variam entre 2%, 5% e 10%.

Resistores de filme metálico são utilizados em aplicações onde se requer precisão, estabilidade e baixo coeficiente de temperatura. O processo de fabricação consiste no depósito de um filme homogêneo de níquel cromo sobre um corpo cerâmico. Esses resistores estão disponíveis com tolerâncias de 1% e 2% e coeficiente de temperatura de 50 e 100 ppm/°C.

Atividade 2

- Pegue 8 resistores, dois de $1\text{ K}\Omega$ (R1 e R2), dois de $10\text{ K}\Omega$ (R3 e R4), dois de $10\text{ M}\Omega$ (R5 e R6), um de $3,3\text{ K}\Omega$ (R7), e um de $6,8\text{ K}\Omega$ (R8).
 - Realize a medida das resistências R2, R4 e R6 com o multímetro.
- 2.1 Determinar o valor de R2, R4 e R6 do item anterior a partir do seu código de cores. Os valores medidos no item anterior estão dentro da precisão especificada pelo fabricante dos resistores?
 - 2.2 Muitas vezes não há disponível comercialmente o resistor necessário. Nestes casos realizam-se associações de resistores. Monte no protoboard o esquema mostrado na Figura 3c, e medir a resistência resultante. Considerando as precisões envolvidas, esta associação pode substituir um resistor de $10\text{ K}\Omega$? Por quê?

Fonte de Alimentação



Figura 4 – Fonte de alimentação Minipa MPC-3003D

A fonte de alimentação disponível no laboratório possui três conjuntos de saídas de tensão (vide Figura 4). Duas saídas (1 e 2) são variáveis e uma saída é fixa. As saídas fornecem as seguintes tensões:

+30V / 0V / -30V , +3A / 0A / -3A (variável)
5V @ 3A (fixa)

Para realizar-se o ajuste de tensões variáveis, existem dois voltímetros/amperímetros digitais instalados no painel frontal. A tensão e corrente podem ser ajustadas pelos botões. A chave seletora deve ser colocada em posição independente, ou seja, as fontes *master* e *slave* fornecem tensões de forma independente, sem ligação em série ou em paralelo.

Atenção !

Antes de ligar a fonte, os ajustes de corrente sempre devem ser colocados em seu valor mínimo. Este procedimento evitará possíveis danos ao equipamento, como, por exemplo, a possibilidade da queima dos fusíveis internos.

Atividade 3

- Utilizando o conjunto de saídas 2 (master), ligar a fonte de alimentação e posicionar o botão de voltagem com o indicador apontando horizontalmente para esquerda.
 - Aumentar a corrente até aparecer valor de tensão no display. A luz verde C.V. estará acesa.
- 3.1 Medir a tensão na saída da fonte com o multímetro. Para isto, ligue o multímetro e coloque o seu seletor na escala adequada para medir o valor de tensão mostrado no display. Anotar o valor na fonte, a escala escolhida e o valor medido no multímetro. Fazer essa medida com a ponta vermelha do multímetro na saída positivo da fonte, e a ponta preta do multímetro na saída terra (GND) da fonte. Depois, mantendo a ponta vermelha no mesmo lugar, colocar a ponta preta na saída negativa da fonte. Explicar o que foi observado.
- 3.2 Esta medida deve ser feita com a chave seletora do multímetro na posição DC ou AC? Por quê?

Atividade 4

- Montar os circuitos da Figura 3b no protoboard (monte cada circuito separadamente, não todos em paralelo!). Utilize a saída fixa da fonte para alimentação do circuito.
- 4.1 Qual a tensão esperada V_2 sobre todos os resistores R2, R4 e R6, considerando a tensão de alimentação de 5,0 V?
- 4.2 Meça as tensões com o multímetro. Verifique e justifique as discrepâncias encontradas. Adote um modelo adequado para representar o multímetro e avalie a impedância de entrada do mesmo.
- 4.3 O fenômeno observado pode ser encontrado apenas com o uso de multímetros ou é possível de ser observado com outros equipamentos também? Em quais situações?

Osciloscópio

O osciloscópio é um dos instrumentos mais versáteis em eletrônica. Este equipamento permite a monitoração de sinais na tela. Com esse instrumento é possível visualizar formas de onda e medir a frequência de sinais periódicos.

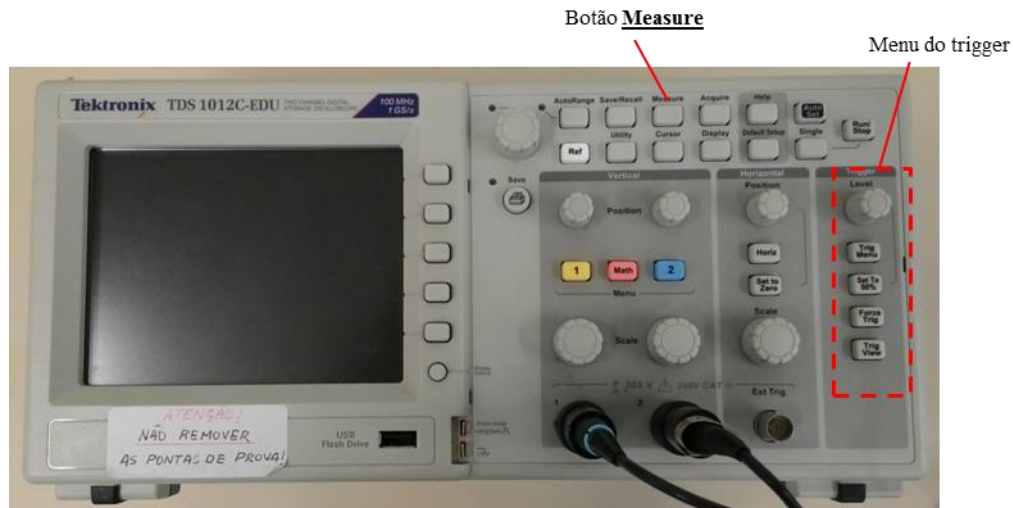


Figura 5 – Osciloscópio Tektronix TDS – 1012C-EDU

O osciloscópio possui dois canais de leitura; cada canal corresponde a uma ponta de prova. Note que as **duas pontas de prova tem o mesmo terra**; por isso não é necessário conectar as pontas de terra ao mesmo tempo – um só ponto de terra é suficiente. Como em todo osciloscópio, é possível modificar as escalas verticais e horizontais, e modificar a posição do sinal na tela (note que as escalas são apresentadas na tela).

Cada canal pode ser desligado da tela apertando o botão correspondente (CH1 ou CH2).

Cada canal pode ser mostrado como Ground, CC ou AC, apertando o primeiro botão no lado direito da tela (Coupling). **Em geral, utilize CC; AC mostra o sinal com o valor médio subtraído, e Ground mostra a posição de tensão zero.**

O sinal mostrado na tela fica parado apenas quando o valor de disparo (TRIGGER), representado pela seta amarela (para CH1) ou azul (para CH2) no lado direito da tela, se encontra entre os valores mínimo e máximo do sinal. Portanto, se você notar que o sinal não pára na tela, modifique o trigger através do botão de trigger.

Há uma série de botões especiais na parte superior do osciloscópio; evite mexer nesses botões, pois os comandos podem paralisar os demais botões. No entanto um botão é extremamente útil e deve ser utilizado: MEASURE. Uma vez apertado o botão MEASURE, é possível obter dados dos sinais: Valor médio, Frequência, Período, Valor Eficaz (mostrado como RMS).

Gerador de Funções

O gerador de funções é uma ferramenta auxiliar para teste, utilizado para simular vários sinais encontrados em circuitos práticos (vide Figura 6). As frequências geradas vão de 0,2 Hz até ~ 2 MHz, dispostos em 7 faixas. Esse tipo de gerador serve para injetar sinais periódicos em circuitos eletrônicos.

Note que o gerador de funções produz dois tipos de sinal: um deles tem forma de onda e amplitude controladas, que chamamos de sinais variáveis, e o outro tem uma forma de onda quadrada padrão, chamado sinal TTL, como mostrado no lado direito da Figura 6. *Para sinais variáveis*, o gerador de funções permite o controle do valor médio do sinal através do botão de offset, da amplitude do sinal e também da sua frequência.

Como o display do gerador de funções mostra apenas a frequência do sinal de saída, para saber a amplitude e o offset do sinal é necessário o uso de um osciloscópio.

O gerador de funções está descalibrado e o botão de offset apertado não significa offset nulo!



Figura 6 – Gerador de funções Politem FG-8102

Atividade 5

- Ligar o gerador de funções e o osciloscópio e conectar o osciloscópio na saída de sinal variável do gerador de funções.
- 5.1 Ajustar o gerador de funções para gerar uma onda senoidal com 2,0 V pico a pico (V_{pp}) com tensão de offset nula e frequência de 1 kHz. Anotar as escalas escolhidas no osciloscópio.
- 5.2 Alterar a frequência do gerador de sinal para uma frequência arbitrária. Ajustar os controles do osciloscópio para estabilizar o sinal na tela. Compare o valor de frequência medido com o osciloscópio com o valor fornecido pelo gerador de funções. Utilize o botão MEASURE para realizar a medida no osciloscópio.
- 5.3 Ajuste uma onda triangular de 1 kHz e 2,0 V_{pp} com offset nulo no CH1 e conecte o sinal de saída TTL do gerador de funções no CH2. Na tela do osciloscópio ajustar os dois sinais de forma que o valor nulo de CH2 seja o mesmo do offset de CH1. Faça um **gráfico** cotado com as formas de onda geradas.

Check list no final da aula

- 1- **Equipamentos:** Liste os equipamentos usados e verifique se estão desligados.
- 2- **Multímetro:** os cabos das pontas de prova do multímetro estão arrumados? Deixe o multímetro no tampo inferior da bancada, para que possamos conferir facilmente se está desligado.
- 3- **Osciloscópio:** Os cabos das pontas de prova do osciloscópio estão arrumados?
- 4- **Cabinhos:** Há cabinhos caídos no chão ou na bancada?
- 5- **Caixa de Cabinhos:** A caixa de cabinhos está completa?
- 6- **Cabos:** Os cabos foram recolocados nos lugares de origem?
- 7- **Empréstimos:** Usou alguma coisa de outra bancada? O que? Foi devolvido?
- 8- **Defeitos:** Encontrou algum defeito? Preencheu a Comunicação de Defeito?
- 9- **Limpeza:** A bancada está limpa?

Experiência 2: Circuitos retificadores e filtros capacitivos

Esta experiência aborda o estudo de circuitos capazes de transformar sinais alternados AC em sinais com uma única polaridade. Há três tipos básicos de circuitos desta natureza, conforme podem ser estudados no livro texto:

1. Retificadores de meia-onda.
2. Retificadores em ponte de diodos.
3. Retificadores onda-completa com transformador de derivação central (NÃO será montado neste experimento).

Além disso, nesta experiência serão realizados ensaios destes retificadores associados a filtros capacitivos. A Figura 7 contém os circuitos relevantes, enquanto que a Figura 8 mostra o transformador da fonte de alimentação a ser utilizada.

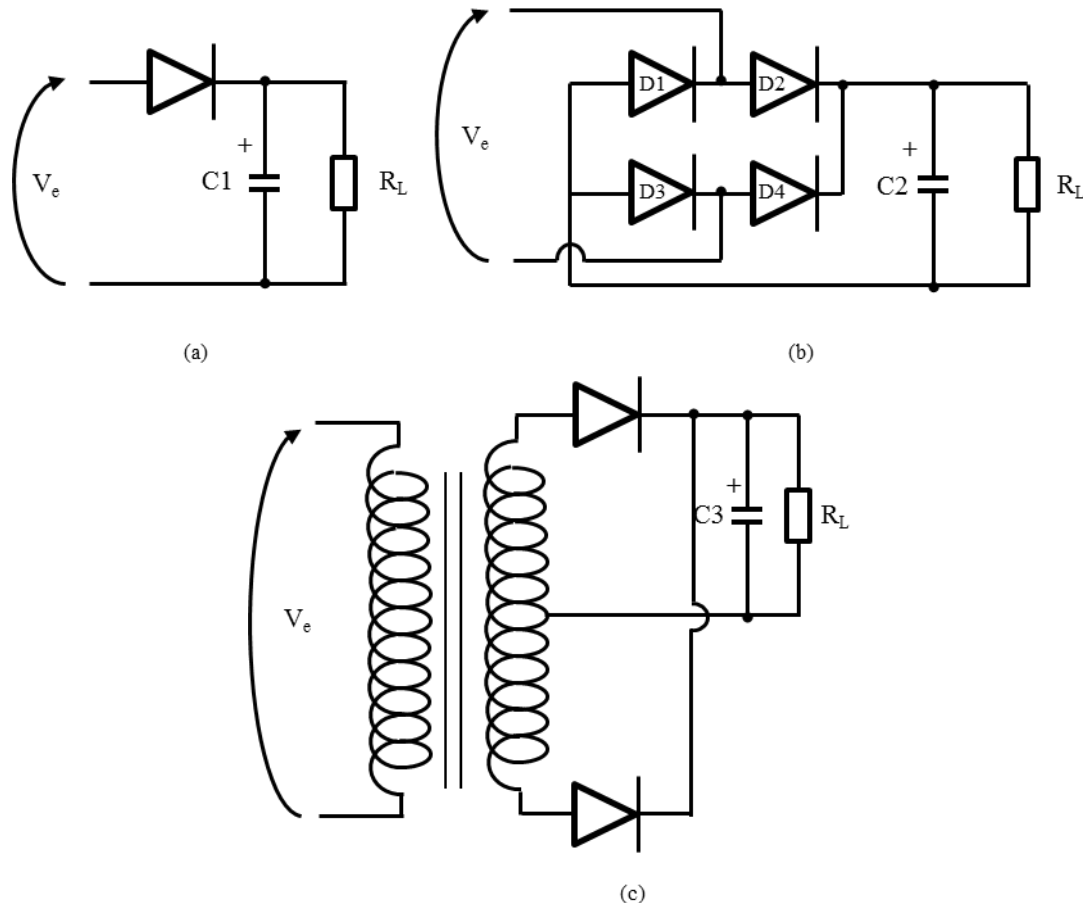


Figura 7 – Retificadores (com filtros capacitivos): (a) meia-onda, (b) onda completa com ponte de diodos, e (c) onda completa com derivação central. Note que os filtros capacitivos tem sua polaridade indicada

O transformador a ser utilizado está montado em um chassi. Os enrolamentos secundários estão disponíveis através de bornes e identificados por (8V / 8V) e (15V / 15V / N), conforme ilustrado na Figura 8. O primário deste transformador deve ser ligado na **rede elétrica** (110 V_{ef}).

A saída (15 / 15 / N), com derivação central e os blocos correspondentes aos circuitos retificadores e filtros serão implementados nesta experiência. À medida que obtiver os dados, complete as Tabelas 2 e 3.

A saída (8V / 8V) NÃO será utilizada nesta experiência.

Atenção!!!

Verifique a polaridade dos capacitores eletrolíticos antes de conectá-los, para evitar explosão dos mesmos!!!

Em caso de dúvida, chame o professor antes de realizar as conexões!!!

A polaridade dos capacitores deve ser usada como indicado na Figura 7!

Em havendo fumaça no circuito, desligue a fonte imediatamente!!!

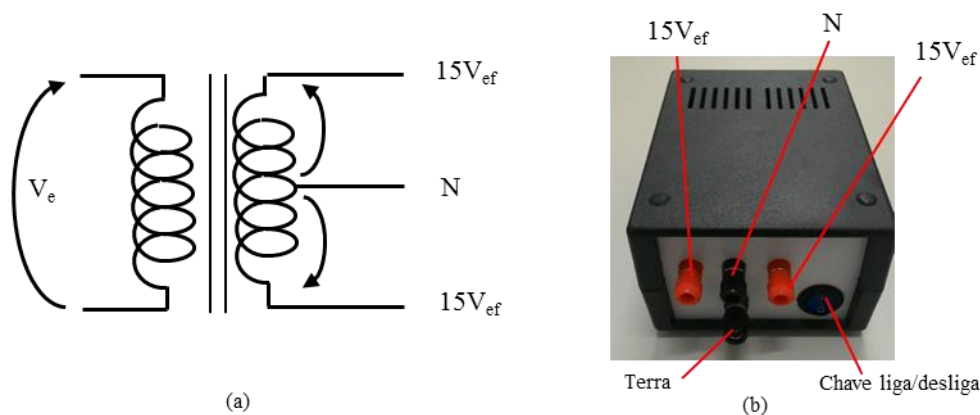


Figura 8 – (a) esquema do transformador utilizado e b) a fotografia da caixa com o transformador e as suas conexões.

Atividade 1

- 1.1 Para o retificador de meia-onda calcule o capacitor de filtragem C1 adequado para se obter 3 Vpp de ondulação sobre uma carga de 1 KΩ, sendo a entrada de 15 V_{ef}.
- Monte um retificador de meia onda. A tensão senoidal deve ser proveniente da derivação central N e de um dos extremos 15 V_{ef}. Utilize um diodo retificador e como carga um resistor de 1 kΩ/ 5 W.
- 1.2 Faça o gráfico das formas de onda da tensão no secundário e na carga.
- 1.3 Preencha a tabela 2 com os valores esperados (teóricos) e medidos, primeiro SEM o capacitor, e depois COM o capacitor C1 de valor calculado anteriormente. Anotar no relatório o valor do capacitor utilizado.
- 1.4 Coloque outro capacitor de mesmo valor em paralelo e faça o gráfico da ondulação resultante.
- 1.5 Discutir os resultados obtidos.

Tabela 2: Medidas de retificador de meia-onda

Meia onda				
	SEM filtro capacitivo		COM filtro capacitivo	
	Calculado	Medido	Calculado	Medido
Tensão de pico na carga				
Tensão de pico reversa no diodo				
Tensão eficaz do secundário (RMS)				
Tensão média na carga				
Frequência de ondulação				

Atividade 2

- 2.1 Para o retificador em ponte calcule o capacitor de filtragem C2 adequado para se obter 3 Vpp de ondulação sobre uma carga de 1 KΩ, sendo a entrada de 15 V_{ef}.
- Monte um retificador em ponte com quatro diodos. A tensão senoidal deve ser proveniente da derivação central N e um dos extremos 15 V_{ef}.
- 2.2 Faça o gráfico das formas de onda da tensão no secundário e na carga.
- 2.3 Preencha a tabela 3 com os valores esperados (teóricos) e medidos, primeiro SEM o capacitor e depois com o capacitor C2 de valor calculado anteriormente. Anotar no relatório o valor do capacitor utilizado.
- 2.4 Coloque outro capacitor de mesmo valor em paralelo e faça o gráfico da ondulação resultante.
- 2.5 Discutir os resultados obtidos.

Tabela 3: Medidas de retificador de onda completa em ponte

Onda completa em ponte				
	SEM filtro capacitivo		COM filtro capacitivo	
	Calculado	Medido	Calculado	Medido
Tensão de pico na carga				
Tensão de pico reversa no diodo (anotar o número do diodo medido)				
Tensão eficaz do secundário (RMS)				
Tensão média na carga				
Frequência de ondulação				

Experiência 3: Transistores e circuitos reguladores

Nesta experiência será feito um estudo de transistores operando em duas configurações: como amplificador polarizado por divisor de tensão, e como seguidor de emissor em uma fonte regulada por Zener.

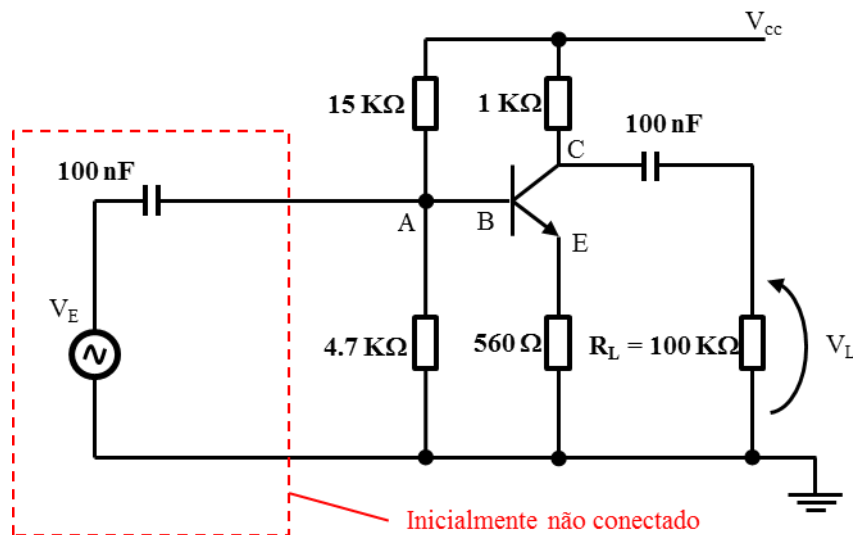


Figura 9 – Esquema de circuito amplificador transistorizado

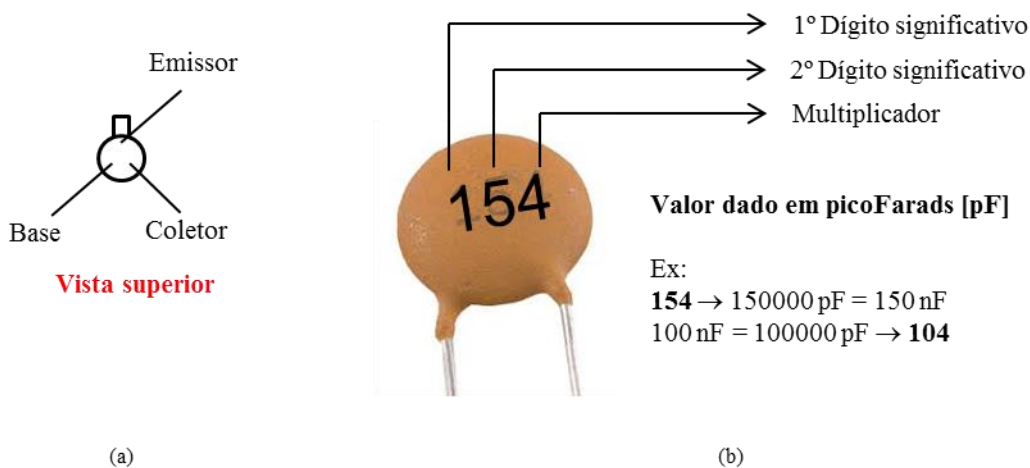


Figura 10 – (a) Pinagem do transistor NPN, visto de cima e (b) código de valores para capacitores cerâmicos.

Atividade 1

- Monte o circuito esquematizado na Figura 9, inicialmente sem o gerador de sinais.
 - 1.1 Calcule e meça as tensões VCE, VBE e VCB no transistor.
 - 1.2 Calcule e meça a tensão no ponto A ignorando a corrente de base.
- Conecte o gerador de sinais no circuito, como mostrado na Figura 9.
 - 1.3 Ajuste o sinal de entrada (V_E , fornecido pelo gerador de sinais) em frequência de 1 kHz e amplitude 1 Vpp, offset zero. Nestas condições, calcule o ganho teórico do circuito (relação entre amplitude de tensão de entrada e tensão na carga).
 - 1.4 Nas mesmas condições, meça e desenhe gráficos para a tensão (V_L) sobre a carga R_L , e obtenha o ganho do circuito. O ganho experimental se aproxima do ganho teórico? Quais podem ser os erros na modelagem?
 - 1.5 Considere agora o mesmo circuito, mas com sinal de entrada em frequência de 100 kHz e amplitude 1 Vpp. Obtenha o ganho. O que mudou? (não há necessidade de desenhar o gráfico)

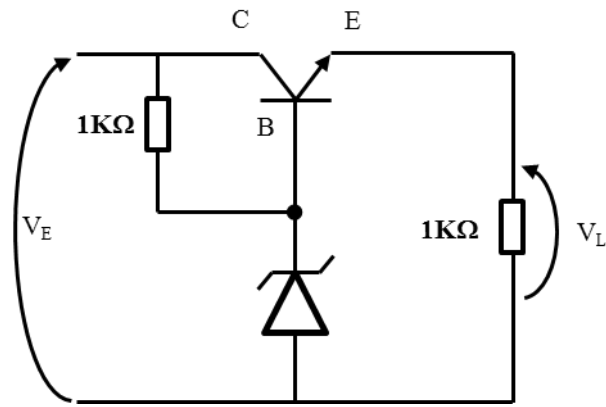


Figura 11 – Regulador série transistorizado

Atividade 2

- 2.1 Monte agora o circuito esquematizado na Figura 11. Utilize um Zener de 12 V, I_{zmin} de 5 mA. Qual seria o valor esperado de regulação de entrada, isto é, qual seria a tensão máxima V_L esperada?
- 2.2 Confirme a regulação de entrada, utilizando valores de 5, 7, 9, 11, 13, 15, 17, 19, 21, 23, 25 V para V_E . Anote as tensões de saída na tabela 4.

Tabela 4: Medidas de tensão de saída do circuito da Fig. 11

V_E	5	7	9	11	13	15	17	19	21	23	25
V_L											

Experiência 4: Amplificadores operacionais

Os amplificadores operacionais são circuitos utilizados para as mais diversas atividades. O objetivo desta experiência é apresentar as características básicas de um Amplificador Operacional e os circuitos fundamentais em que este elemento é aplicado.

Filtros

Um filtro é um circuito cuja função é deixar passar sinais com certa faixa de frequências, rejeitando (ou atenuando) as outras frequências fora dessa faixa. A Fig. 12 mostra um filtro passivo tipo passa-baixas. Dependendo dos capacitores utilizados, para frequências altas as reatâncias capacitivas e indutivas tomam um valor conjunto muito grande; portanto, a tensão aplicada na entrada do filtro não é transferida para a saída. Lembre-se da expressão da reatância capacitiva: $X_C = 1/(j\omega C)$, onde $\omega = 2\pi f$; e da reatância indutiva: $X_L = j\omega L$. Assim, a tensão aplicada à entrada do filtro não passa para a saída de forma homogênea para todas as frequências.

A frequência de corte f_c é a frequência em que o ganho de tensão cai aproximadamente 3 dB do valor do ganho máximo.

Como as grandezas envolvidas na análise de filtros envolvem diferenças numéricas muito grandes entre valores de ganhos e frequências, é conveniente adotar uma relação logarítmica na apresentação desses parâmetros. **O ganho de tensão ou de potência é medido em decibéis (dB) e é definido como $A_{db} = 20 \log (V_s/V_E)$.**

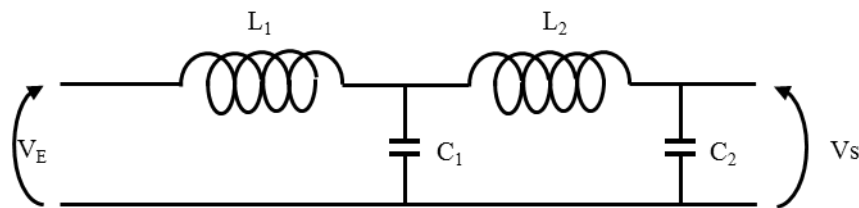


Figura 12 – Filtro passa-baixas passivo

Os filtros passivos em geral requerem a presença de um indutor que é um componente pesado, caro e difícil de obter comercialmente. Geralmente os indutores devem ser projetados e enrolados por quem deseja utilizá-los. Outro fato importante é que os filtros passivos não permitem ganho em tensão (efetuam apenas atenuação). Além disso, eles possuem uma perda resistiva interna, denominada perda de inserção, pois os indutores e capacitores não são componentes ideais. Para evitar esses inconvenientes, são utilizados os filtros ativos no processamento de sinais.

Filtro ativo de primeira ordem

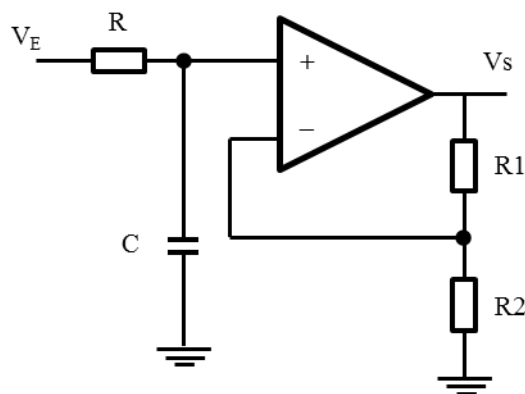


Figura 13 – Filtro passa-baixas de primeira ordem

Figura 13 mostra um filtro ativo de primeira ordem, que é assim denominado por possuir um pólo em sua função de transferência entre a entrada e a saída (ou seja, é representado por uma equação diferencial de primeira ordem). O pólo é igual à constante RC no circuito, e a taxa de decaimento do ganho de tensão, após a frequência de corte, é de 20 dB/década. O ganho de malha aberta do filtro e a frequência de corte deste filtro são dados pelas relações:

$$A = (R1/R2) + 1$$

$$f_c = 1/(2\pi RC)$$

Filtro ativo de ordem superior

O filtro da Fig. 14 é chamado de filtro passa-baixas de segunda ordem devido ao fato da função de transferência entre entrada e saída possuir dois pólos (ou seja, o filtro é modelado por uma equação diferencial de segunda ordem), resultando em uma taxa de decaimento do ganho de tensão após a frequência de corte de 40 dB/década. No circuito da Fig. 14 o ganho em baixas frequências é dado por $A = 1 + R1/R2$. A frequência de corte é $f_c = 1/(2\pi RC)$

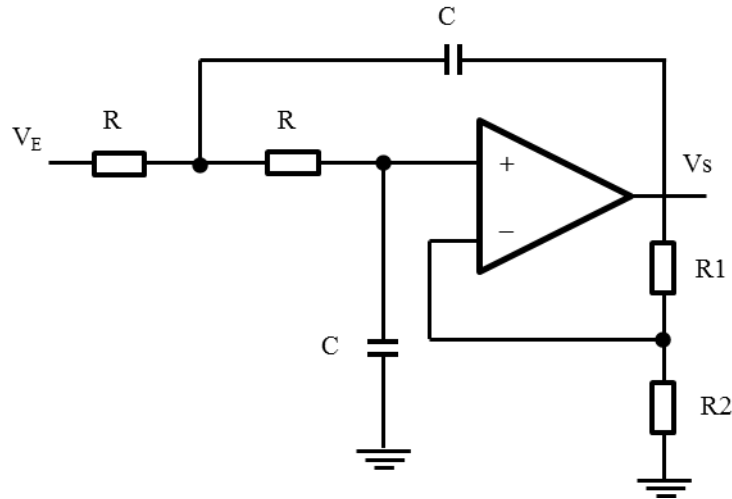


Figura 14 – Filtro passa-baixas de segunda ordem

Uma análise matemática para esse filtro revela que o ganho em malha fechada $A = 1,586$ é um valor crítico, equivalendo ao comportamento crítico da equação diferencial. Para o ganho de 1,586 a resposta obtida para a banda de passagem será a mais plana possível ("flat response"); isso é conhecido por Resposta Butterworth ou Resposta Maximamente Plana, sendo por esse motivo uma das mais populares. Como o ganho de tensão em malha fechada deve ser 1,586, a equação $R_1 = 0.586R_2$ deve ser satisfeita para obtermos resposta Butterworth.

Quando se faz necessária uma atenuação maior, ainda é possível projetar uma célula de filtro de terceira ordem. Em geral não é recomendável utilizar-se um circuito com amplificador operacional para filtros de ordem superior, pois se pode ter instabilidade devido ao número excessivo de pólos e zeros. Em geral, nesses casos utilizam-se várias seções de no máximo dois pólos. A Tab. 5 fornece os ganhos de tensão para se construir filtros Butterworth passa-baixas. Note que um filtro de dois pólos necessita de um ganho de 1,586, como discutido anteriormente. Um filtro de três pólos requer duas seções, a primeira sendo um filtro de um pólo com um ganho qualquer e a segunda um filtro de dois pólos com um ganho de 2, e assim por diante.

Tabela 5: Ganhos para filtros Butterworth

Pólos	Taxa de Dec.	1ª Seção	2ª Seção	3ª Seção
1	20 dB	Qualquer		
2	40 dB	1,586		
3	60 dB	Qualquer	2	
4	80 dB	1,152	2,235	
5	100 dB	Qualquer	1,382	2,382
6	120 dB	1,068	1,586	2,482

Atividade 1

O circuito integrado a ser utilizado nesta experiência é o CI TL081, cujo encapsulamento bem como suas ligações internas e pinagem são apresentados na Figura 15.

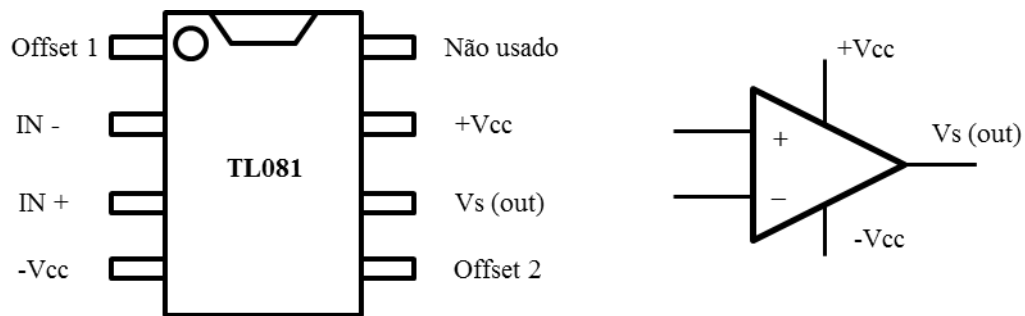


Figura 15 – CI TL081

- Monte no protoboard um amplificador inversor, com $R_1 = R_2 = 1 \text{ k}\Omega$. Alimente o circuito integrado com uma das fontes ajustáveis e a fonte fixa, com tensões de +5 V e -5 V.
 - Aplique na entrada do circuito um sinal senoidal proveniente do gerador de sinais, com frequência de 1 kHz, e amplitude $2,0 V_{pp}$ (pico a pico), e offset zero.
- 1.1 Meça, utilizando os dois canais do osciloscópio, os valores de entrada e saída, comparando-os e faça o gráfico dos dois sinais.
 - 1.2 Modificando o valor de R_2 e da frequência, preencha a Tabela 6, anotando as amplitudes de entrada e saída e calcule a relação de ganho e entrada.

Tabela 6: Tabela de valores de tensão pico a pico para circuito inversor

R2	Frequência	Ve	Vs	$G = V_s/V_e$
1K	1 KHz			
	100 KHz			
10K	1 KHz			
	100 KHz			

Atividade 2

- Modifique o circuito anterior, de forma que ele se torne um somador de duas entradas, com todos os resistores iguais a $10 \text{ k}\Omega$.
 - A alimentação deve ser de +5 V e -5 V.
 - Coloque em uma das entradas do somador, V_{E2} , um sinal constante proveniente da fonte ajustável não utilizada.
 - Na outra entrada do somador, coloque um sinal senoidal V_{E1} de 1 kHz, $2,0 V_{pp}$, com offset zero.
- 2.1 Faça o gráfico da onda da saída.
 - 2.2 Modifique o nível de tensão das entradas, V_{E1} e V_{E2} , anotando os valores de entrada e de saída obtidos para 4 situações diferentes (Anotar V_{E1} , V_{E2} e saída).

Atividade 3

- Projete o circuito de um filtro passa-baixas de primeira ordem para frequência de corte de 1 kHz. Adote $C = 10 \text{ nF}$, $R_1 = 10 \text{ k}\Omega$ e o ganho em baixas frequências igual a 10.
 - Monte o circuito do filtro projetado.
 - Ajuste o gerador de funções para onda senoidal, frequência de 100 Hz e em um nível de amplitude de entrada sem saturação.
- 3.1 Mantendo fixa a amplitude de entrada, preencha os dados da Tab. 7.
 - 3.2 Com esses dados faça um gráfico ganho x frequência, no computador e imprima o gráfico a ser anexada no relatório. Obtenha a frequência de corte e a taxa de decaimento do filtro, conforme o exemplo mostrado na Fig. 16. **Notem que a escala horizontal é logarítmica.**

Tabela 7: Anotações para o filtro passa-baixas de primeira ordem

Frequência	V_e	V_s	G	G (dB)
100 Hz				
200 Hz				
500 Hz				
1 KHz				
2 KHz				
5 KHz				
10 KHz				

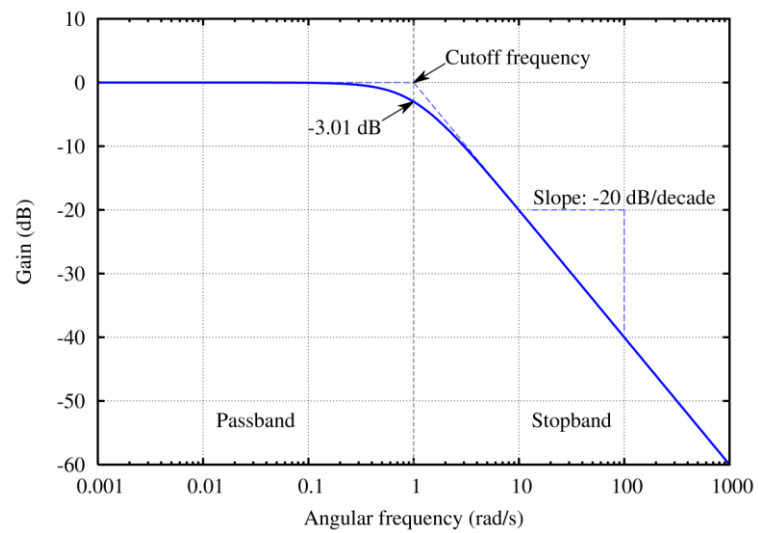


Figura 16 – Exemplo de gráfico ganho X frequência

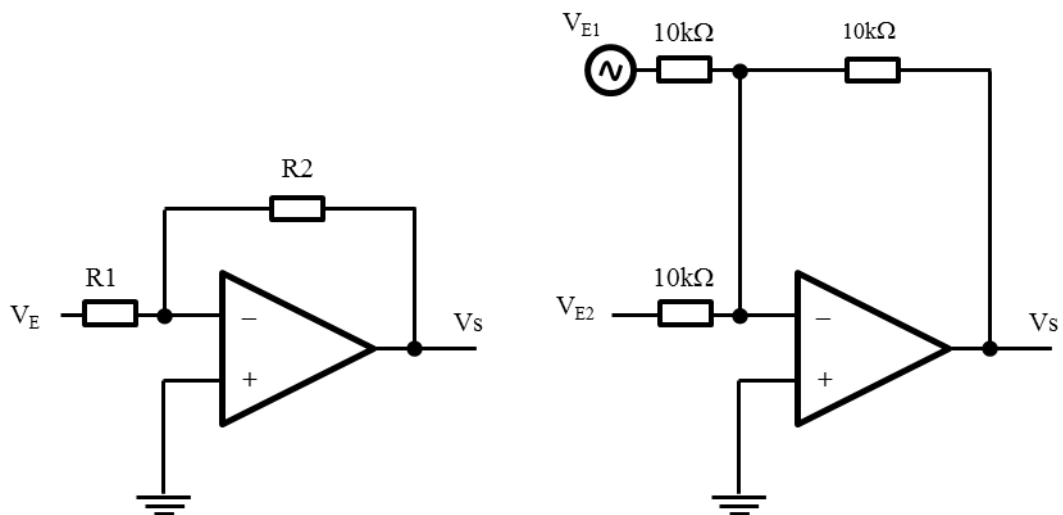


Figura 17 – Esquemas de montagem de circuitos inversor e somador

Experiência 5: Circuitos osciladores e conversores digital-analógicos

Esta experiência analisa *circuitos osciladores e conversores digital-analógicos*.

Circuitos osciladores são fundamentais em eletrônica, servindo como temporizadores, clocks e geradores de sinal. Todo equipamento de medição que envolve medidas cíclicas, como osciloscópios ou multímetros digitais, contém osciladores. A experiência foca em circuitos de relaxação (com portas lógicas e capacitores) e no circuito integrado 555 (que envolve resistores, capacitores, transistor de potência e flip-flop).

Existem várias maneiras de classificar um circuito oscilador. Em primeiro lugar, um circuito oscilador pode produzir diferentes tipos de onda: quadrada, triangular, senoidal, dente de serra, rampa. Em segundo lugar, circuitos osciladores variam em estabilidade e precisão. Os circuitos mais simples, que utilizam resistores e capacitores em conjunto com portas lógicas, não têm frequências precisas e podem ser afetados por temperatura. Os circuitos mais complexos em geral utilizam cristais piezelétricos para produzir frequências precisas. Osciladores *de relaxação* utilizam o seguinte princípio: um capacitor é carregado através de um resistor (fazendo com que a tensão no capacitor suba gradualmente) até certo ponto; a partir desse ponto o capacitor é descarregado, e o ciclo recomeça.

Para entender o conteúdo da experiência, verifique os seguintes pontos do livro texto:

- Circuito astável com amplificador operacional (Capítulo 13.5).
- Circuitos com CI 555 (Capítulo 13.7).

Os circuitos relevantes para esta experiência estão apresentados na Fig. 19.



Figura 18 – Conexões de CI TL081 e CI 555

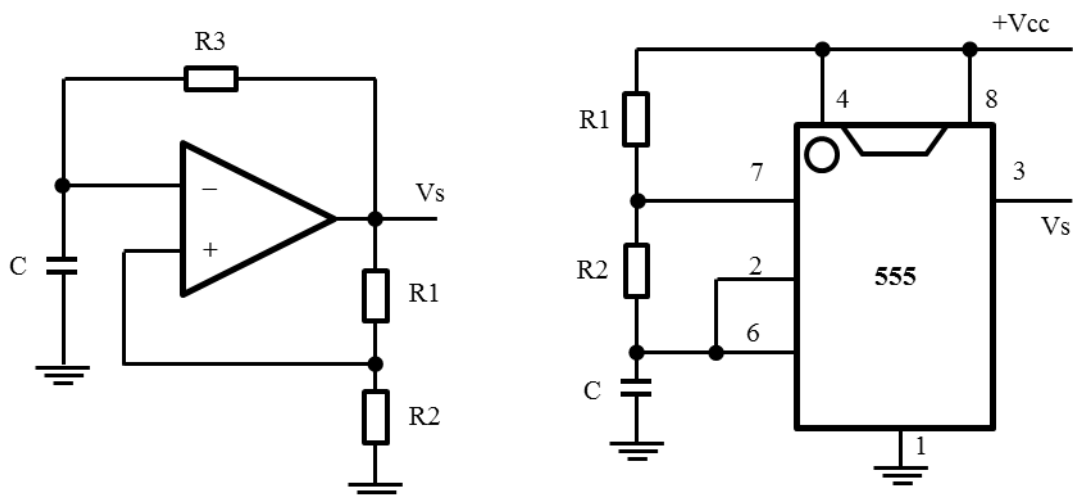


Figura 19 – Circuitos osciladores astável com amplificador operacional e com CI 555

Além disso, a experiência aborda conversores digital-analógicos. Um conversor digital-analógico (DAC) transforma um número binário em um nível de tensão correspondente. Suponha que um DAC de 4 bits deva ser projetado, gerando uma saída entre 0 e 15 volts. O intervalo 0-15 deve então ser dividido em 15 subintervalos (já que o zero corresponde à terra). Se a entrada for 0010 (ou seja, número 2 em binário), a saída deve ser $2 * (15/15) = 2$ volts, e assim por diante.

Existem várias maneiras de construir um conversor digital-analógico. Um dos esquemas mais simples é ilustrado na Figura 20, para um conversor de 3 bits. O princípio de funcionamento do circuito é baseado no comportamento de

“somador” que o amplificador operacional permite. Note que o ponto A é um terra virtual devido à realimentação. Portanto, cada entrada X, Y ou Z gera uma corrente inversamente proporcional ao resistor entre a entrada e o terra virtual. Considere primeiro o sinal X e suponha que $X = V_{cc}$. Nesse caso, a corrente por R1 é $V_{cc} / 2 \text{ k}\Omega$, e essa mesma corrente fluirá por R4, gerando uma tensão de $-V_{cc} / 2$ na saída. Considere agora o sinal Y e suponha que $Y = V_{cc}$. Pelo mesmo raciocínio (baseado na terra virtual em A), o sinal Y contribuirá com $-V_{cc} / 4$ na saída. Finalmente, se $Z = V_{cc}$, a contribuição de Z será $V_{cc} / 8$ na saída. Todas essas tensões são somadas (devido à terra virtual) e o circuito adquire um carácter de DAC. Portanto a saída é proporcional ao número binário XYZ (note que X é o dígito mais significativo): $V_s = -(X/2 + Y/4 + Z/8)$.

É importante notar que o circuito da Figura 20 coloca o **amplificador operacional em configuração inversora**; portanto a constante de proporcionalidade entre saída e entradas é negativa.

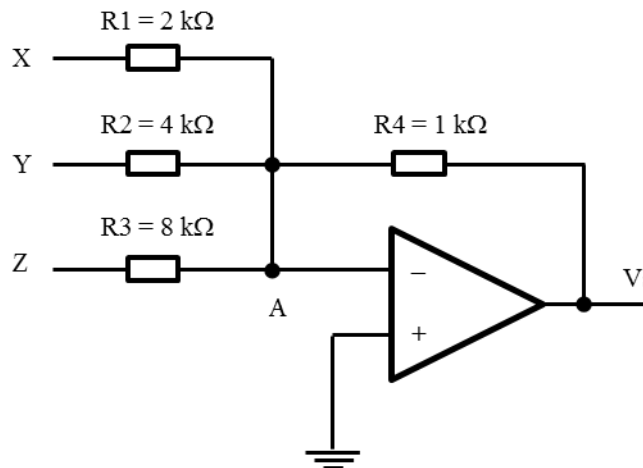


Figura 20 – Conversor digital-analógico por somador

Um fato muito importante sobre o circuito da Fig. 20 é o chamado “Princípio da Superposição”. O Princípio da Superposição simplesmente enfatiza que um circuito linear com muitas entradas pode ser analisado em etapas: cada entrada pode ser analisada separadamente (com todas as outras entradas em terra); o efeito de todas as entradas é a soma dos efeitos das entradas em separado. Como o circuito da Fig. 20 é linear, este princípio pode ser utilizado.

Este tipo de conversor por somador tem um problema sério: para criar conversores de muitos bits, passa a ser necessário utilizar resistores de resistência muito alta. Como ilustração, suponha que a menor resistência em um DAC de 14 bits é de $1 \text{ K}\Omega$ e calcule o valor da maior resistência. Para resolver esse problema, existem circuitos que usam malhas de resistores para “simular” a duplicação de resistências.

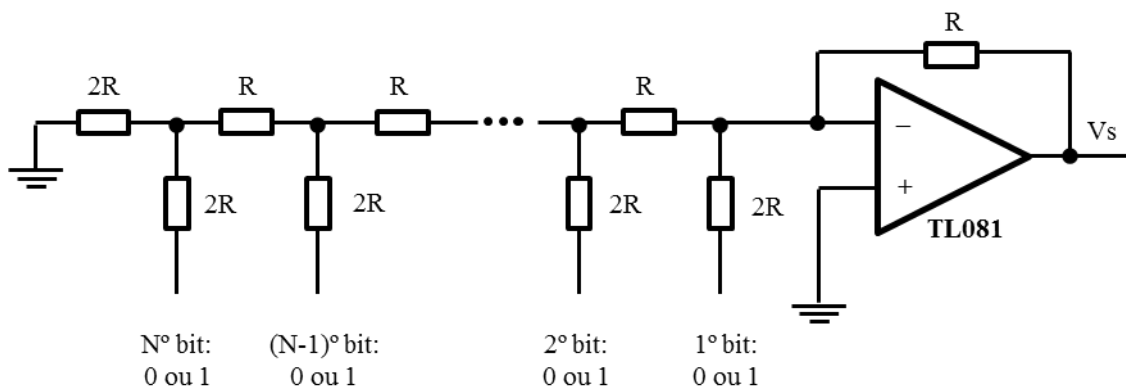


Figura 21 – Conversor digital-analógico com malha resistiva

O circuito da Fig. 21 utiliza uma malha simétrica de resistores de dois valores (R e 2R) para gerar um conversor digital-analógico. Esta malha é chamada rede R2R. A derivação das propriedades da rede R2R é relativamente complexa, e está resumida no Apêndice. A ideia básica é a seguinte: como o circuito é linear, é possível analisar uma entrada por vez. Cada entrada “enfrenta” uma resistência duas vezes maior que a entrada anterior, devido à presença de um bloco $2R/R$. O amplificador operacional simplesmente soma todas essas entradas.

No circuito da Fig. 21, o 1º. bit é o mais significativo, e o Nº. bit é o menos significativo.

Note que o valor exato do resistor R não é importante no resultado final; o que importa é que exista uma relação de 2 para 1 entre os resistores indicados. Note também que o circuito é bastante rápido; o único atraso na conversão é o tempo de resposta do amplificador operacional, que em geral é extremamente pequeno. Finalmente, note que **o amplificador está na configuração inversora**, portanto V_s é negativa.

A gama de aplicações de conversores digital-analógico é vasta, pois DACs são utilizados para controlar motores e sensores a partir de computadores. Além disso, DACs podem ser utilizados como blocos básicos na construção de conversores analógico-digital (tópico da próxima experiência). Existem variantes em torno da ideia de conversores digital-analógicos: conversor digital-frequência (produzem uma frequência proporcional a um número binário) e conversor frequência-analógico (produzem uma tensão proporcional a uma frequência de entrada, como um rádio FM).

Atividade 1

- Monte um oscilador astável com amplificador operacional TL081 ($C = 10 \text{ nF}$, $R_1 = R_2 = R_3 = 10 \text{ k}\Omega$) e utilizando alimentação de 12V e -12V.
- 1.1 Faça os **gráficos** das formas de onda nos pinos 2, 3 e 6. Meça a frequência e a amplitude dos sinais.

Atividade 2

- Monte um oscilador com o CI 555, utilizando $C = 10 \text{ nF}$, $R_1 = R_2 = 100 \text{ k}\Omega$ e alimentação $V_{cc} = 12 \text{ V}$.
- 2.1 Faça os **gráficos** das formas de onda dos pinos 2, 3, e 7. Meça a frequência e amplitude dos sinais.

Atividade 3

- Pegue o conversor digital-analógico de quatro bits já montado, utilizando a malha resistiva R2R, conforme o projeto mostrado na Fig. 22. Entenda o circuito.
 - Use $V_{ref} = 5 \text{ volts}$ e alimentação simétrica +/- 10 volts no amplificador operacional. Este circuito tem quatro sinais de entradas (simbolizados pelas quatro chaves), que podem estar em terra (zero) ou tensão de referência V_{ref} (um). A saída é igual ao valor de tensão representado pelas entradas em binário; onde cada bit corresponde a $V_{ref} / 16$. Note que todos os resistores têm valor R ou 2R.
- 3.1 Para entrada 1010, qual é a tensão de saída (em função de R e V_{ref})?

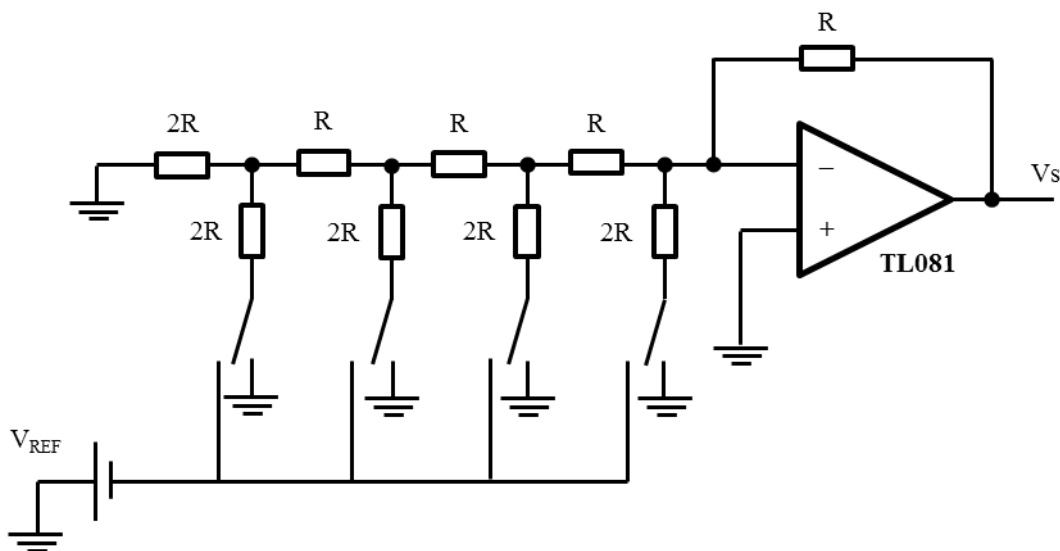


Figura 22 – Projeto de um conversor digital-analógico

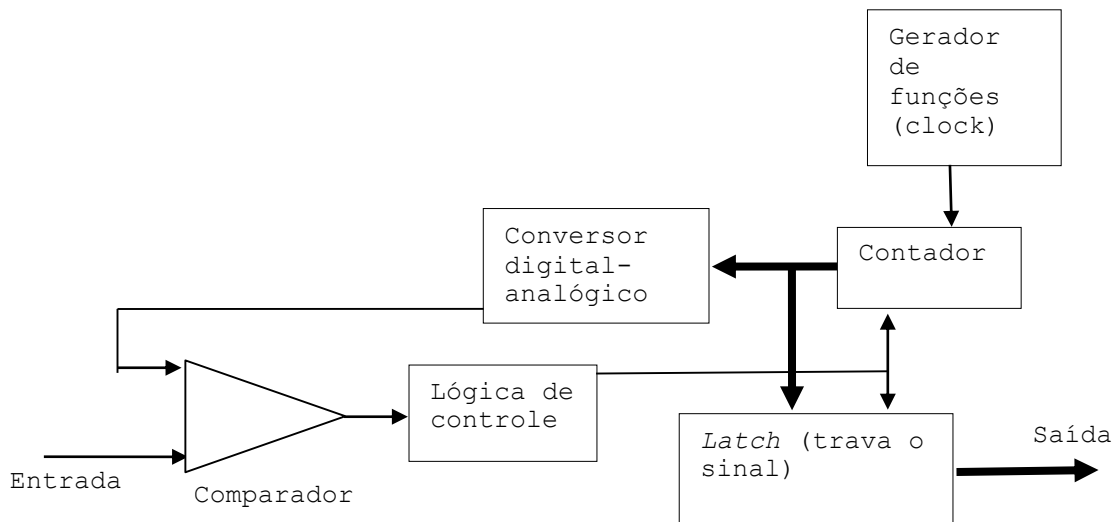
Apêndice: Conversores Analógico/Digital

Conversores analógico-digitais (conversores AD) transformam um sinal analógico em um conjunto de bits. Conversores AD são circuitos fundamentais em automação, particularmente em instrumentação e controle, já que sensores em geral produzem sinais analógicos. O objetivo desta experiência é projetar e montar um conversor analógico-digital que será usado como um multímetro simplificado.

Existem vários métodos para construir um conversor AD. Os mais comuns são:

- O método mais rápido (chamado *flash conversion*) consiste em utilizar um banco de comparadores. Por exemplo, para gerar um conversor AD de 4 bits, são necessários 16 comparadores. O primeiro comparador compara o sinal de entrada com 1/15 de V_{cc} ; o segundo comparador compara o sinal de entrada com 2/15 de V_{cc} ; e assim por diante. A desvantagem é o grande número de comparadores utilizados.
- Conversão por aproximação sucessiva. Uma série de tensões é gerada digitalmente, até atingir a tensão de entrada. Esse será o método utilizado nessa experiência e será detalhado adiante.
- Existem métodos baseados na geração de rampas de tensão (rampa simples, dupla rampa). Em geral, a conversão por rampa funciona com a geração de uma rampa de tensão cuja inclinação é proporcional ao sinal de entrada. Um contador digital conta quantos períodos de clock são necessários para esta rampa de tensão ir de um valor V_{min} a um valor V_{max} . O valor do contador quando esse tempo passa é proporcional à tensão de entrada. Conversão AD por rampa é um método relativamente complexo, mas tem vantagens em termos de precisão e velocidade. Para uma determinada precisão, um conversor por rampa em geral é mais veloz que o conversor por aproximações sucessivas correspondente.

O diagrama de blocos de um conversor AD por aproximações sucessivas está na figura abaixo.



O circuito é conceitualmente bastante simples. Para um dado sinal de entrada, o contador inicia contagem em zero (binário) e prossegue até o valor máximo binário. Cada valor do contador é transformado em um valor analógico (por um conversor digital-analógico) e comparado com o sinal de entrada. Quando o sinal de entrada é igual ao sinal do conversor digital-analógico, o conteúdo do contador é exatamente a conversão digital do sinal de entrada.

O diagrama de blocos contém:

- Um contador binário e um conversor digital-analógico que devem ter números de bits correspondentes; se o contador conta 4 bits, o DAC tem que converter 4 bits.
- O circuito de *latch* garante que a saída contém a conversão mais recente, e impede que a saída receba os sinais da contagem produzida pelo contador. Produza o latch de 4 bits usando 4 flip-flops tipo D (com o circuito integrado 7474, cuja pinagem já foi mostrada).
- A lógica de controle deve garantir duas coisas: quando o sinal de entrada é igual ao sinal do conversor digital-analógico (ou seja, na borda de subida do comparador), o latch deve segurar o sinal do contador e o contador deve zerar. Faça a lógica de controle verificando se o contador e os flip-flops obedecem à borda de subida ou à borda de descida.

O circuito acima demora no máximo 16 períodos de clock para “encontrar” o valor de saída em um conversor AD de 4 bits. A conversão de k bits em um conversor por aproximações sucessivas pode demorar até 2^k períodos de clock, o que pode ser proibitivo em uma aplicação prática. Por isso, circuitos profissionais de aproximações sucessivas (e circuitos implementados em circuitos integrados) utilizam uma outra técnica de aproximações sucessivas. A idéia é executar uma “busca binária” para encontrar o sinal de entrada. Em lugar de um contador, uma lógica de busca binária é construída. Inicialmente, todos os bits de entrada do DAC são colocados em 0. Então, a partir do bit mais significativo, cada bit é colocado em 1. Caso a saída do DAC não exceda o sinal de entrada, o bit é deixado em 1; caso contrário o bit volta a ser zero. Dessa forma, a busca pelo sinal de entrada nunca demora mais que k períodos de clock para um conversor de k bits. Convença-se que o esquema descrito faz busca binária!

Conversores AD por aproximação sucessiva são relativamente precisos e rápidos, sendo bastante comuns em circuitos integrados.

Monte o conversor AD projetado no pré-relatório. Utilize o circuito como um voltímetro digital simplificado, medindo entradas contínuas fornecidas pela fonte regulável.

Leitura Adicional

Para entender mais sobre a interface entre circuitos digitais e analógicos, bem como sobre vários tipos de conversores, o livro mais completo e acessível é *The Art of Electronics*, Paul Horowitz e Winfield Hill, Cambridge University Press, 2ª. edição 1989. Infelizmente esse livro não está traduzido para português.