

Objetivo de Aprendizado

1. Entender o comportamento transiente de um circuito elétrico consistindo de um capacitor e um resistor (circuito RC).
 - a. Descrever a dependência temporal da tensão e corrente de um circuito simples;
 - b. Descobrir como a descarga elétrica em um capacitor carregado muda com o tempo quando o capacitor é conectado em um circuito com resistor;
2. Simular o comportamento da curva característica de descarga de um capacitor em um circuito RC;
3. Compreender o comportamento de variáveis não-lineares e lineares;
4. Realizar ajuste linear por software considerando o limite de validade do modelo;
5. Entender o conceito de constante de tempo;
6. Determinar experimentalmente a constante de tempo de um circuito RC utilizando uma buzina sonora.

Introdução

Capacitores e resistores são importantes componentes para muitos circuitos elétricos. Eles são utilizados em fontes de alimentação, osciladores, filtros elétricos e em muitos outros equipamentos eletrônicos. Desta forma, compreender como capacitores e resistores funcionam em um circuito é fundamental para o entendimento dos circuitos elétricos mais comuns. Iremos estudar uma das configurações mais simples, conhecida como circuito RC, no qual um resistor e um capacitor em série são conectados a uma fonte de alimentação ou bateria.

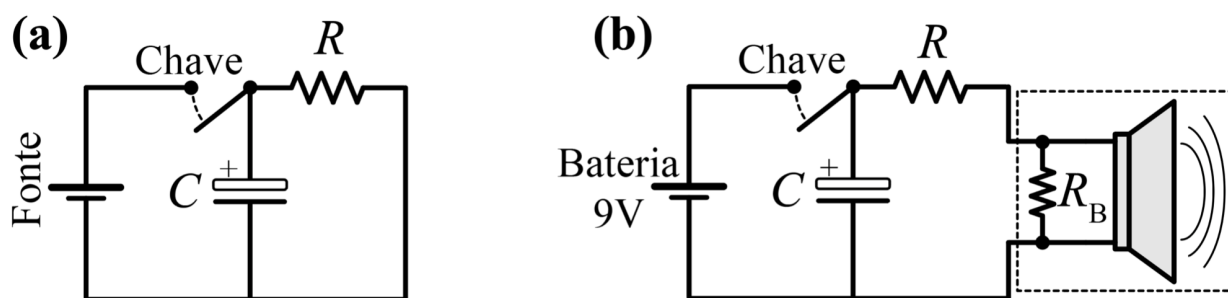


Figura 1: (a) Circuito RC simples. A chave permite a ligação com a fonte DC para carregar o capacitor e desligar a chave com a fonte para descarregá-lo. (b) Circuito RC com um buzzer e chave para ligar o capacitor na bateria (fonte) de 9V. O buzzer apresenta uma resistência interna R_B que pode ser estimada pela curva característica do mesmo.

Neste projeto vamos investigar como um circuito elétrico RC responde quando uma tensão DC é aplicada nele, e medir as características de descarga do capacitor (Figura 1(a)). Ao descarregar o capacitor

através de um resistor podemos mostrar que ele perde carga em função do tempo de forma exponencial. Como resultado a voltagem $V(t)$ através do capacitor em função do tempo(t) é dada por:

$$V(t) = V_0 \exp[-t/(RC)]. \quad (1)$$

O tempo de descarga do capacitor é determinado pelo termo na exponencial $\tau = RC$, chamado de constante de tempo do circuito. Assim, medindo a tensão no capacitor em função do tempo podemos calcular a constante de tempo do circuito RC.

Circuitos RC geralmente carregam e descarregam muito rápido, necessitando de equipamentos rápidos de medida como o osciloscópio. No entanto, utilizando capacitores eletrolíticos com capacitâncias grandes é possível obter constantes de tempo da ordem de alguns segundos e portanto utilizar equipamentos de medidas mais lentos.

Uma forma para medirmos indiretamente a constante de tempo de descarga de um circuito RC é utilizando a intensidade de som de um [buzzer piezoelétrico](#), como descrito no artigo de Groff [1] (Figura 1(b)). Em vários tipos de buzzers piezoelétricos a intensidade de som emitida é linearmente proporcional à voltagem em seus terminais. Como a intensidade sonora produzida é medida em unidades de decibéis (logarítmica), ela será uma função linear decrescente em função do tempo, ou seja:

$$\beta_{dB}(t) = m t + 20 \log\left(\frac{V_0}{V_f}\right), \quad (2)$$

onde $\beta(dB)$ é a intensidade sonora em unidade de decibéis, V_0 é a voltagem inicial no tempo $t = 0$ e V_f é a voltagem no tempo $t = t_{final}$. Desta forma, a intensidade sonora produzida pelo buzzer é uma função linear do tempo com coeficiente angular m , que é inversamente proporcional a constante de tempo do circuito:

$$m = -20 \frac{\log(e)}{\tau}. \quad (3)$$

Na descrição dessa relação assumimos que:

1. toda a energia fornecida pelo circuito é convertida em som;
2. o som é irradiado pelo buzzer em todas as direções de forma simétrica,
3. a intensidade sonora a uma distância r do buzzer é a dada pela razão da potência dissipada pela superfície de área de uma casca esférica de raio r . **Dica: mantenha a distância do celular ao buzzer constante durante todo o experimento.**

Usaremos o modelo descrito pela equação 2 para testar como se dá a descarga em um circuito RC. Para isso faremos o experimento de descarga para algumas combinações de resistores e capacitores de modo a determinar pelo menos cinco constantes de tempo distintas em cada um destes circuitos.

Simulação TinkerCAD

No experimento, você irá medir o que acontece com a tensão em um capacitor carregado quando ele é colocado em série com um resistor em um circuito. Porém, *antes de fazer essas medições*, é **fortemente recomendado** que faça as simulações qualitativas sugeridas abaixo a respeito do comportamento do capacitor para melhor entender o que acontece quando a carga elétrica do capacitor está decaindo.

Usando o software TinkerCad, monte o circuito da Figura 1(a) composto dos seguintes componentes: capacitor ($C = 500 \mu\text{F}$, $1000 \mu\text{F}$ ou $2000 \mu\text{F}$), resistor ($1k\Omega$, $4,7k\Omega$ ou $10k\Omega$), bateria de 9V, buzzer e interruptor. Um exemplo de montagem o TinkerCAD pode ser visto na Figura 2.

Assim, a simulação deverá ilustrar o procedimento utilizado para medir a intensidade sonora. Deste modo sua simulação terá circuitos com diferentes constantes de tempo.

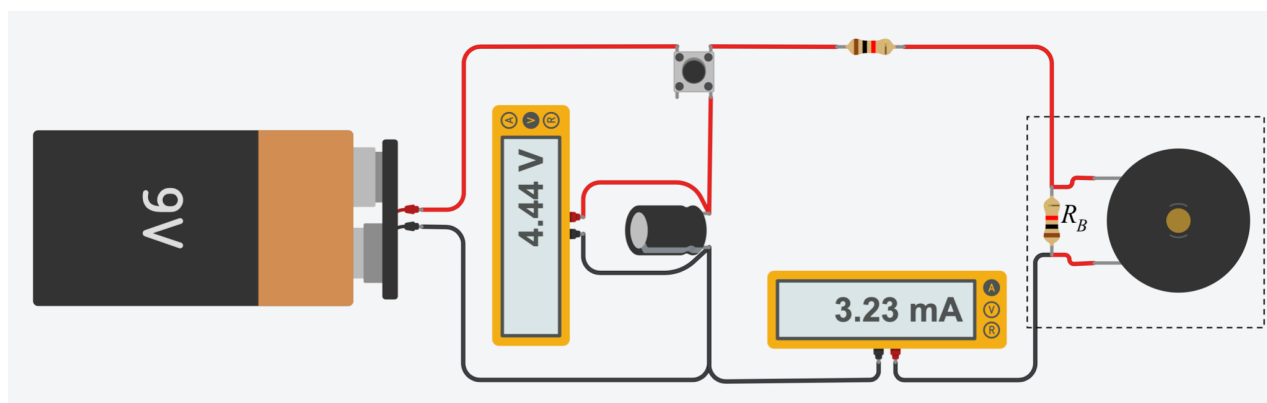


Figura 2: Circuito RC simples implementado no TinkerCAD sem o uso da proto-o-board. O interruptor permite conectar ou desconectar a bateria do circuito. Nesta ilustração foi utilizado um resistor adicional em paralelo ao buzzer (R_B) para simular a resistência equivalente interna do mesmo. Antes de fazer a simulação, meça essa resistência interna do *buzzer* usado no TinkerCAD usando um multímetro e a considere em seu modelo.

1. Com o interruptor na posição em que a bateria está conectada ao circuito, rode a simulação e descreva o que acontece com o buzzer.
2. Usando o interruptor, remova a bateria do circuito e veja o que acontece. Descreva as suas observações.
3. Faça um esboço do volume do som emitido pelo buzzer em função do tempo. Defina $t = 0$ quando a bateria é desconectada do circuito. Neste momento o capacitor começa a descarregar através da resistência em série presente no circuito. O que acontece quando a capacitância do capacitor é reduzida/aumentada? O que acontece quando resistência em série é reduzida/aumentada?
4. O circuito equivalente do buzzer que vamos utilizar possui uma resistência interna em série com o circuito. Leve em consideração na sua simulação e no seu experimento.

Repita suas simulações anteriores, mas agora transpondo a montagem para o uso da placa/proto-o-board. Utilize os valores e configurações (associação de resistores e capacitores) que você pretende usar em seu experimento final.

Atenção: Esta montagem deverá conter a montagem experimental completa para registro de dados e indicar também como a protoboard/placa será utilizada na montagem. Deste modo, você poderá utilizar esta simulação para o seu vídeo planejamento.

Dica: Veja esse [vídeo](#)¹ e a animação que aparece no TinkerCAD para entender como a matriz de conexões na placa pront-o-board é feita.

Vídeo para ilustração do planejamento

Um vídeo da preparação experimental com **aproximadamente 1 minuto** deverá ser submetido no Moodle em uma tarefa própria. O vídeo deve mostrar como você planeja realizar o experimento e mostrar resultados preliminares já obtidos. **Não são necessárias edições elaboradas.** Seu vídeo deverá conter:

1. Foto(s) da simulação no TinkerCad com a protoboard e circuitos com pelo menos duas constantes de tempo e o resistor interno do buzzer. Use o LED para entender e visualizar a polaridade da corrente no circuito.
2. Vídeo curto do circuito funcionando com o buzzer
3. Foto dos circuitos montados na protoboard;
4. Passos para a medição da intensidade sonora do buzzer;
5. Fotos/*screenshots* da tela do smartphone;
6. Alguns valores estimados da constante de tempo do circuito com uma estimativa de suas incertezas. Vocês podem calcular τ utilizando os valores nominais de R e C e suas incertezas.
7. Vídeo curto funcionando com buzzer. **Descreva qualitativamente** o comportamento da intensidade sonora do buzzer. A intensidade sonora do buzzer é constante ou cresce/decrece com o tempo? A variação da intensidade sonora, se houver, é monotônica ou há oscilações/picos de tensão?

Assim, o vídeo de aproximadamente um minuto deverá ilustrar o procedimento utilizado para se medir a constante de tempo com um *smartphone* e um buzzer. Além disso, a montagem experimental completa para registro de dados e algumas leituras do visor do *smartphone*.

Material Utilizado

1. 01 - Buzzer contínuo com oscilador interno SB-3/30V-1-C ou similar;
2. 01 - Protoboard 170 pontos;
3. 01 - Kit Jumper Macho / Macho;
4. 02 - Capacitor Eletrolítico 1000uF/16V;
5. 02 - LED de alto brilho 5mm Verde;
6. 05 - Resistor 4K7 - 5% (1/4W);
7. 05 - Resistor 10K - 5% (1/4W);

¹ <https://youtu.be/GvI7scfhc90>

8. 05 - Resistor 1K - 5% (1/4W);
9. 01 - bateria 9V;
10. Smartphone ou microfone;
11. Software de aquisição de dados.

Métodos

Durante o experimento 4 vocês trabalharam com circuitos *RC* e observaram o comportamento da tensão sobre o resistor e o capacitor. Neste experimento vamos investigar o processo de descarga de um capacitor em circuitos elétricos simples. Com o capacitor completamente carregado, vamos descarregá-lo através do circuito. Utilizando o *buzzer* como sonda, vamos encontrar indiretamente a corrente elétrica que circula no circuito pela intensidade sonora da buzina.

Para investigar o processo de descarga de um capacitor vamos montar o circuito preparado na segunda parte da simulação com o TinkerCad, que contém um capacitor eletrolítico de C , uma resistência de R , uma bateria e um buzzer. Utilizando os cabos (*Jumpers*) vamos fazer a conexão do terminal positivo da bateria para carregar o capacitor. A seguir, desconectamos a bateria do circuito para descarregar o capacitor através da resistência e buzzer. A tensão nas placas do capacitor é monitorada pela intensidade sonora do buzzer. Lembrando que $Q = CV$, a tensão é um indicativo direto das cargas acumuladas nas placas do capacitor. Os dados que serão obtidos com o aplicativo *Physics Toolbox Suite* (*Phyphox*) selecionando a função *Amplitude do Áudio* (*Audio Meter*)² e selecionando a função *recording (play)* e exportando os dados no final da aquisição.

Observações: Antes de iniciar seu experimento, monte alguns circuitos simples e verifique o comportamento do buzzer. Monte alguns circuitos RC com o LED e o buzzer e veja como a intensidade luminosa do LED e a intensidade sonora do buzzer variam com o tempo para diferentes valores de resistência e capacitância. Como que essas suas observações se comparam com as simulações?

Atenção: O circuito final não deverá conter o LED pois este é um elemento não linear cuja resistência depende da tensão aplicada.

Muito cuidado ao conectar o capacitor! Veja a nota técnica 1 antes de ligar o circuito à bateria.

No seu relatório:

- 1) Descreva o procedimento experimental adotado no projeto.
- 2) Quais são as variáveis dependente e independente?
- 3) Descreve qualitativamente o comportamento da intensidade sonora em função do tempo. Utilize $t = 0$ quando a bateria é desconectada do circuito. Neste momento o capacitor começa a descarregar através da resistência e do buzzer presente no circuito. Explique o que acontece quando a capacitância do capacitor é reduzida/aumentada? O que acontece quando a resistência em série é reduzida/aumentada?

² Outro software gratuito que pode ser baixado e usado gratuitamente em computador é o Audacity (<https://www.audacityteam.org>).

- 4) Usando os dados dos arquivos obtidos pelo celular, faça um gráfico da intensidade sonora no buzzer em função do tempo. O gráfico deve conter no mínimo 5 curvas: os circuitos com os diferentes valores de resistência e capacitância.
- 5) Descreva o padrão observado no gráfico. Evite nesse momento fazer previsões a respeito da dependência matemática da intensidade sonora com o tempo (exemplo: a intensidade sonora decresce quadraticamente com o tempo). **A sua descrição deve ser apenas qualitativa:** A intensidade sonora do buzzer é constante ou cresce/decresce com o tempo? A variação da intensidade sonora, se houver, é monotônica ou há oscilações/picos de tensão?
- 6) Agora sim, utilizando o modelo para a curva intensidade sonora vs. tempo t , linearize as curvas obtidas. Faça um ajuste da função linearizada aos dados experimentais a fim de obter as constantes e suas respectivas incertezas. Essas constantes têm unidades? Quais são? Substitua os valores obtidos no modelo e escreva a equação encontrada. Qual é a constante de tempo para cada um dos circuitos obtida através do ajuste aos dados?
- 7) Monte uma tabela com os valores nominais de capacitância, resistência, o valor nominal de $\tau = RC$ e o valor de τ obtido pela regressão linear, com suas incertezas associadas. Adicione nessa tabela uma coluna contendo o valor da resistência interna do *buzzer*. Esse valor pode ser encontrado pela curva característica (tensão versus corrente) retirada do *datasheet* de seu *buzzer*, assim como fizemos no Experimento 3. Para isso, considere os valores nominais de R e C , os valores da resistência interna do buzzer e os valores obtidos pela regressão linear. Não se esqueça de avaliar as incertezas em ambos os casos.
- 8) Com os valores encontrados no item anterior discuta qual dos valores é mais preciso levando em consideração as incertezas.
- 9) Compare a constante apropriada do seu modelo para descarga do capacitor, obtida no item (6) acima, com as constantes de tempo τ obtidas no item (7). Considere as incertezas e diga se os valores obtidos são compatíveis entre si. A partir de suas medidas, relacionar a possibilidade e as dificuldades de se obter experimentalmente a constante de tempo de um circuito RC
- 10) Discuta se o modelo (equação 2) foi capaz de descrever o comportamento da intensidade sonora em função do tempo. A previsão da constante de tempo obtida pelos valores de RC e o valor obtido para a constante de tempo pelos dados são condizentes?

Durante a coleta de dados você irá fazer medidas de intensidade sonora em função do tempo para os vários circuitos. Verifique se você coletou dados por tempo suficiente para permitir fazer um ajuste linear adequado. **Atenção:** lembre-se de não utilizar em sua análise os dados que não são descritos pelo seu modelo.

Fontes de Incerteza

Discuta em seu relatório as possíveis fontes de incertezas e como elas afetam os valores experimentais obtidos. Neste projeto (experimento), as principais fontes de incerteza a serem consideradas são:

1. Valores da capacitância e resistência

2. Leitura do *display* do *smartphone*; medições repetidas ou medição única;
3. Posicionamento do microfone do *smartphone* e buzzer;
4. Valor nominal e incerteza da resistência interna do buzzer

Para cada uma das fontes citadas acima, avaliar a incerteza associada e combinar as incertezas pertinentes.

Notas técnicas

Quando estamos num laboratório manipulando osciloscópios, fontes de tensão, dispositivos diversos, é bom estar atentos a alguns detalhes técnicos mínimos a respeito das especificidades dos mesmos. Como caráter informativo listamos abaixo 4 notas técnicas úteis para nosso experimento.

1. **Capacitores eletrolíticos** somente podem ser carregados em um sentido, usando a polaridade correta. Eles podem ser danificados ou "**explodir**" se ligados em polarização reversa. Ao ligar, é necessário verificar a indicação do terminal negativo.

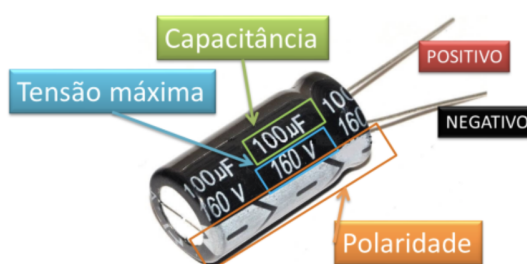


Figura 3: Capacitor eletrolítico utilizado no experimento. Neste tipo de capacitor a tensão negativa deve sempre ser ligada ao polo correto (sinal -).

2. **LEDs** somente permitem a passagem de corrente quando polarizados diretamente. Ao ligar o LED no circuito é necessário verificar a indicação do terminal positivo e negativo. **Dica:** Não ligue o LED diretamente na bateria, **isso irá queimar o LED**. Utilize um resistor de $1k\Omega$ em série com o LED para testar seu LED.
3. O buzzer que utilizamos só funciona quando alimentado com a polarização correta. O fio preto é o terminal negativo e o vermelho o positivo. **Dica:** Você pode testar o seu buzzer ligando ele diretamente na bateria.
4. A distância entre a posição do sensor sonoro no seu *smartphone* e o buzzer é um importante parâmetro para o experimento. Encontre a posição do seu sensor sonoro no *smartphone* e sua orientação. **Alinhe o buzzer em relação ao sensor do seu *smartphone* e mantenha uma distância constante durante todo o experimento!** **Obs:** Não encoste o buzzer no celular, deixe alguns centímetros entre eles.
5. Em alguns casos é melhor usar o microfone existente num fone de ouvido para captar o som emitido pelo buzzer, pois apresentam uma direcionalidade maior, diminuindo a captação de ruído externo.

Rubricas de Avaliação do Relatório do Projeto 2

Pe so	rubrica	Habilidade	Ausente	Inadequada	Precisa melhorar	Adequada
1	B1	Capacidade de identificar o efeito a ser investigado.	O efeito não é mencionado.	A descrição do efeito é confusa ou foge dos pontos de interesse.	O fenômeno é descrito de forma vaga ou incompleta.	O fenômeno a ser investigado é descrito de forma clara.
1	B4	Capacidade de planejar um experimento para investigar um fenômeno	O experimento planejado não investiga o fenômeno.	O experimento planejado não produz dados suficientes que permitam a investigação do fenômeno.	Com o experimento planejado, alguns aspectos relevantes não podem ser observados.	O experimento planejado produz dados suficientes e relevantes para a investigação do fenômeno.
1	G2	Capacidade de avaliar como as incertezas afetam os resultados	Incertezas experimentais não são avaliadas	Há uma avaliação das incertezas, mas na maior parte a avaliação está ausente, vaga ou incorreta.	A avaliação de incertezas não é feita corretamente até o resultado final.	As incertezas são avaliadas adequadamente até o resultado final.
1	G4	Capacidade de registrar e representar os resultados	Dados ou gráficos ausentes ou incompreensíveis.	Alguns dados e gráficos estão ausentes ou difíceis de se compreender.	Todos os gráficos e dados pedidos estão presentes, mas alguns não estão claros.	Todos os dados e gráficos estão presentes e claros.
1	G5	Capacidade de analisar os gráficos	Os gráficos não são analisados	Há uma tentativa de análise dos gráficos, mas tem sérias falhas.	A análise é adequada mas contém alguns erros ou omissões, como a falta de incertezas.	A análise está completa e correta. Coeficientes com incertezas são apresentados.
1	F2	Capacidade de comunicar o tema e descobertas do experimento de forma clara e completa.	Nenhuma discussão sobre o tema e as descobertas do experimento estão presentes	O experimento e as descobertas são discutidos, mas vagamente. Não há reflexão e conclusão sobre a qualidade dos achados.	O experimento e as descobertas são comunicados, mas a reflexão e conclusão final são inadequadas ou incoerentes.	O experimento e as descobertas são discutidos com clareza. Há uma reflexão sobre a qualidade e conclusão final dos achados

A nota poderá ser alterada posteriormente (sempre limitada entre 0 e 10 pontos) segundo os fatores indicados na tabela abaixo

a.	Discussões solicitadas não foram realizadas	Reduzir a nota em até 1,0 ponto.
b.	Uso incorreto de algarismos significativos. Incertezas devem conter um ou dois algarismos significativos.	Reduzir a nota em até 1,0 ponto.
c.	Relatório com mais de 5 páginas	Reduzir a nota em até 1,0 ponto.

d.	Vídeo para ilustração do trabalho do grupo. Caso não seja entregue, o grupo poderá ser penalizado na nota do relatório.	Reduzir a nota do relatório em até 30%
----	---	--

Apêndices

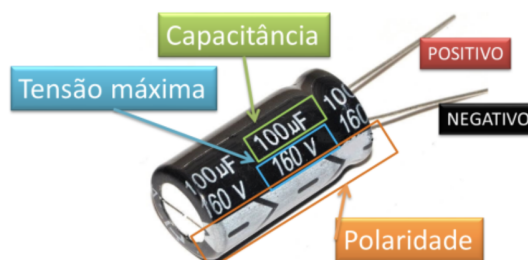
Capacitores

Um capacitor é um dispositivo eletrônico usualmente formado por dois condutores, que podem ser carregados cada um com cargas de valor absoluto igual, mas sinais contrários, separados por um material isolante (dielétrico, podendo inclusive ser apenas ar ou vácuo, ou outro material). O capacitor atua nos circuitos ao armazenar cargas elétricas nesses condutores. Ao fazer isso, o capacitor armazena também energia no campo elétrico gerado pelas cargas. A capacidade de armazenar cargas (por unidade de tensão aplicada) depende das características geométricas e dielétricas do capacitor e recebe o nome de capacitância (C). Assim, a carga Q armazenada e a tensão V apresentada entre os condutores se relacionam por $Q = CV$. No caso de um capacitor de placas planas e paralelas preenchido com um material dielétrico, a capacitância é dada por [1]:

$$C = k \epsilon_0 (A/d), \quad (1)$$

onde k (constante dielétrica) pode ser determinada experimentalmente. Por definição, no vácuo $k = 1$ e o ar tem valor aproximadamente unitário ($k \approx 1$). Como regra geral, $k \geq 1$.

Capacitores³ como os da Figura 1 abaixo são utilizados para armazenar energia (capacitores grandes, usualmente do tipo eletrolítico), controlar sinais de tensão (pequenos, usualmente do tipo cerâmico) e ajustar filtros (capacitores variáveis). Em geral, estes dispositivos são utilizados em circuitos ressonantes, circuitos retificadores e em divisores de frequências. Em um aparelho de rádio existe um circuito que transforma corrente alternada em corrente contínua, sendo constituído basicamente por um capacitor variável que fica em paralelo com uma bobina. Ao ajustar a capacitância deste capacitor permite-se que o receptor do rádio entre em ressonância com a onda de frequência específica que é transmitida pela emissora de rádio, ou seja, sintoniza-se assim a frequência da estação transmissora de onda de rádio requerida.



³ Quando se fala em capacitores eletrolíticos ou cerâmicos, refere-se à presença de um líquido condutor ou ao material dielétrico entre os dois condutores, respectivamente.

Figura 4: Capacitores variados (esquerda) e detalhes de um capacitor eletrolítico (direita).

Uma outra propriedade muito interessante dos capacitores é a de bloquear correntes contínuas e alternadas de baixas frequências e permitir a passagem de correntes alternadas de altas frequências. Em música esta característica dos capacitores é muito útil para separar sons de altas frequências (agudos) que são encaminhados a alto-falantes específicos (tweeters) daqueles sons de baixas frequências (graves) produzidos, por exemplo, pelos woofers. Essa é mais uma propriedade muito interessante de capacitores e que é utilizada para fazer a separação de sons agudos de sons graves. A capacitância, como propriedade de um dispositivo ou objeto, também pode ser utilizada em sensores para determinar outras grandezas físicas. Dentre esses sensores, um exemplo bastante comum é a tela sensível ao toque de vários equipamentos eletrônicos como celulares modernos.

Os circuitos com um capacitor e um resistor em série (RC) são os mais simples e têm amplas aplicações devido às características temporais presentes na carga ou descarga do capacitor. Circuitos RC contém uma fonte ideal, um resistor (R) e um capacitor (C), em geral, inicialmente descarregado. Porém, em um circuito real sempre teremos mais que um capacitor ou ao menos capacitâncias parasíticas inerentes ao próprio circuito. Além disso, os equipamentos e cabos ligados a um circuito introduzem capacitâncias que, para a maioria dos casos, são muito pequenas. No entanto, este pode não ser sempre o caso. Portanto, estas capacitâncias precisam ser consideradas se os capacitores do circuito forem pequenos. Quando adicionamos capacitores a um circuito, a capacitância efetiva poderá ser o resultado de capacitores em série e/ou em paralelo. Quando temos dois deles, digamos C_1 e C_2 , em paralelo a capacitância equivalente é dada pela soma das capacitâncias, isto é [1]:

$$C_{eq} = C_1 + C_2. \quad (2)$$

Se são colocados em série, a capacitância equivalente é dada por [1]:

$$C_{eq} = (C_1 C_2) / (C_1 + C_2). \quad (3)$$

Buzzer Piezoelétrico

Em 1880, Pierre e Jacques Curie estudando a relação entre as propriedades do estresse mecânico e o potencial elétrico observaram que vários cristais (quartzo, topázio, açúcar de cana, sal de Rochelle e turmalina) apresentavam propriedades piezoelétricas, *id est*, uma diferença de potencial elétrico surgia nesses materiais quando estes materiais eram comprimidos [3]. No ano seguinte, o matemático Lippman mostrou que a aplicação de um campo elétrico deveria deformar estes materiais; o que foi observado pelos irmãos Curie [4]. Eles também utilizaram esta propriedade no desenvolvimento do eletrômetro piezoelétrico com cristais de quartzo.

A utilização de materiais piezoelétricos para o desenvolvimento de novas tecnologias e o estudo de propriedades da natureza é um importante campo de estudo na atualidade. O efeito piezoelétrico consiste na

conversão de energia elétrica em mecânica e vice-versa. Este efeito ocorre devido a separação de cargas elétricas em certas estruturas cristalinas levando a uma polarização do material.

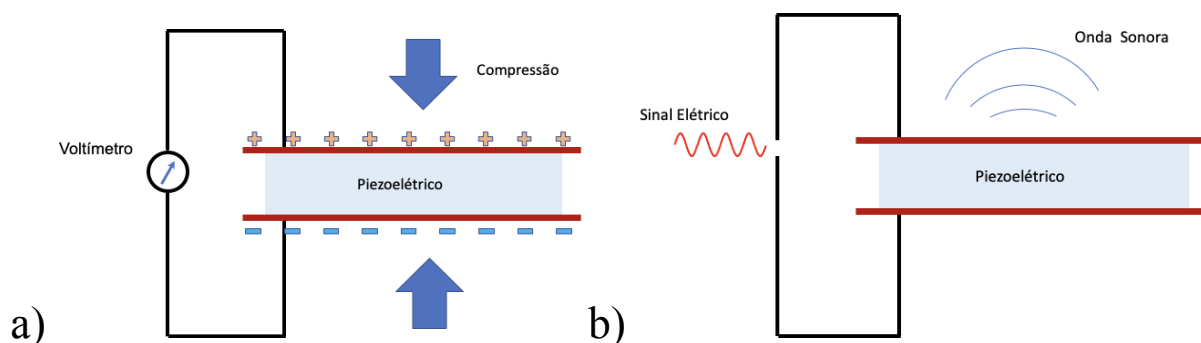


Figura 5: a) Cristal piezoelétrico entre duas placas metálicas com uma compressão externa. As placas metálicas coletam as cargas elétricas na superfície produzindo uma diferença de potencial no circuito; b) Quando um sinal elétrico oscilante é aplicado aos eletrodos metálicos sobre o piezoelétrico o cristal se expande e contrai gerando ondas sonoras.

A resposta piezoelétrica de certos materiais pode ser entendida observando-se sua estrutura cristalina. Nestes materiais ela não é completamente simétrica. Quando um material não está submetido a uma pressão externa, a distribuição de cargas elétricas é uniforme no material, resultando em uma estrutura eletricamente neutra. No entanto, quando uma pressão externa é aplicada, a estrutura cristalina é deformada causando uma separação das cargas elétricas e o aparecimento de dipolos elétricos. Como resultado, cargas elétricas aparecem na superfície do material. Se eletrodos metálicos são conectados a estas superfícies e ligadas a um voltímetro, uma diferença de potencial pode ser medida, figura 5a. Em alguns materiais, o efeito reverso também é observado, *i.e.* quando uma diferença de potencial é aplicada nos eletrodos uma deformação mecânica é produzida no material, ver figura 5 b).

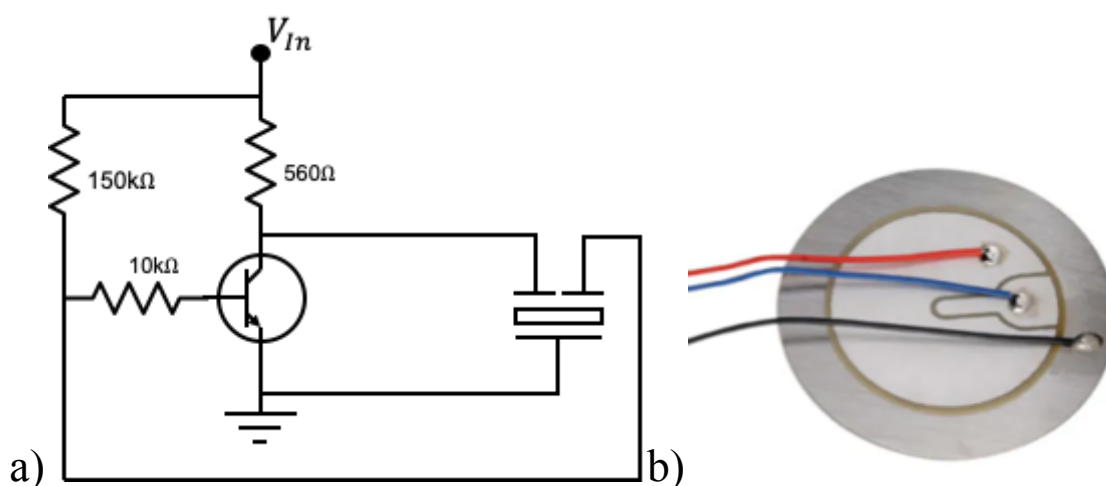


Figura 6: a) Circuito auto oscilante de alimentação do elemento piezoelétrico com um transistor, resistores. b) Elemento piezoelétrico com três terminais.

No buzzer utilizado no projeto, o elemento piezoelétrico possui três eletrodos (Figura 6), chamados de tipo de acionamento automático, e podem ser utilizados para construir um circuito oscilador, Figura 6 a). Quando

uma tensão é aplicada ao elemento piezoelétrico ele modifica sua capacitância e esse sinal é utilizado para criar um sinal de retorno ao circuito de alimentação. Dica: Observe que há uma resistência de 560Ω na entrada do circuito.

Bibliografia

- [1] Groff, J. R. Estimating RC Time Constants Using Sound. *The Physics Teacher* **57**, 393–396 (2019).
- [2] D. Halliday, R. Resnick e J. Walker, Fundamentos da Física, vol.3, 7ª edição (Editora LTC).
 - a) Capítulo 25 – Capacitância; Seção 25-3
 - b) Cálculo da Capacitância; Seção 25-6
 - c) Capacitor com um dielétrico;
 - d) Capítulo 27, seção 27-9 – Circuitos RC.
- [3] Curie, J. & Curie, P. Développement par compression de l'électricité polaire dans les cristaux hémihèdres à faces inclinées. *Bulletin de Minéralogie* **3**, 90–93 (1880)
- [4] Lippmann, G. On the principle of the conservation of electricity. *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science* **11**, 474–475 (1881).