

Unidade de Ensino Potencialmente Significativa (UEPS) Sobre Circuitos Elétricos



Francisco Andreázio Lôbo de Andrade
Autor

Carlos Alberto dos Santos e Geovani Ferreira Barbosa
Orientadores

2018

Sobre a capa

Teste de componentes elétricos de um computador do *Census Bureau* (EUA), na década de 1950, quando a CB estava trocando seu sistema de cartões por fitas magnéticas.

Fotografia em domínio público. Disponível em

https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Census_Bureau_techs_check_out_computer_frame.jpg

Fonte: <https://www.census.gov/history/>

Agradecimento

À CAPES pela bolsa concedida a Francisco Andreázio Lôbo de Andrade durante o curso do MNPEF-UFERSA.

Apresentação

Apresenta-se neste produto educacional uma Unidade de Ensino Potencialmente Significativa (UEPS), elaborada para abordar conceitos pertinentes aos circuitos elétricos, a partir do estudo de cada um dos elementos constituintes, de modo individual e de modo integrado em circuitos. Como o nome sugere, a UEPS foi inspirada na proposta de Moreira (MOREIRA, 2011), e para facilitar sua aplicação, apresentamos um Guia do Professor baseado em nossa experiência em sala de aula com o produto.

Embora seja predominantemente baseada na teoria de aprendizagem de Ausubel (AUSUBEL, 1969; MOREIRA, 1979), a UEPS também apresenta elementos vygostkianos (VYGOTSKY, 1991), na medida em que utilizando a estratégia de ensino baseado em projeto a intervenção didática envolve os alunos em trabalhos de equipe, e consequentemente em amplas relações sociais.

A proposta tem grande significado ecológico, uma vez que os alunos usaram componentes eletro-eletrônicos extraídos de computadores abandonados no almoxarifado da escola. Esse procedimento tem por finalidade dar um destino prático e educacional a componentes que iriam aumentar o já crescido lixo eletrônico. Os alunos tiveram a oportunidade de discutir essa dramática problemática do lixo eletrônico.

Embora tenha se desenvolvido em torno da construção de um detector de metais e de uma bobina de Tesla, por parte dos alunos, a estrutura da presente intervenção didática pode ser usada na exploração de outros equipamentos. O conteúdo relativo a esses projetos inclui noções de dispositivos semicondutores, além de conceitos de eletricidade e magnetismo pouco usuais em nossos cursos de ensino médio, como a lei de Faraday-Lenz e os circuitos osciladores LC, RC e RLC. Em função disso, apresenta-se aqui os conceitos básicos que foram utilizados na transposição didática utilizada no produto educacional, assim como descrições detalhadas dos funcionamentos dos equipamentos fabricados pelos alunos.

Quando não for dito o contrário, equações e definições básicas são extraídas desses livros didáticos (HALLIDAY; RESNICK, 1991; MENEZES *et al.*, 2010).

SUMÁRIO

SOBRE A CAPA	2
AGRADECIMENTO.....	3
APRESENTAÇÃO.....	4
1 NOÇÕES BÁSICAS DE ELETRICIDADE E MAGNETISMO COMO SUBSUNÇORES AUSUBELIANOS	7
2 FUNDAMENTOS DA BOBINA DE TESLA	8
3 FUNDAMENTOS DO DETECTOR DE METAIS	13
3.1 LEIS DE FARADAY E DE LENZ	14
3.2 INFLUÊNCIA DO MEIO NO VALOR DO CAMPO MAGNÉTICO E NAS PROPRIEDADES DE UMA BOBINA	16
3.3 MODELOS USUAIS DE DETECTORES DE METAL.....	17
3.3.1 BFO – Oscilador de frequência de batimento.....	17
3.3.2 VLF – Balança de indução	18
3.3.3 PI – Indução de pulso	19
3.4 DETECTOR DE METAIS COM CIRCUITO INTEGRADO 555	20
4 NOÇÕES DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SEMICONDUTORES	21
4.1 INTRODUÇÃO	21
4.2 ANTECEDENTES HISTÓRICOS DA FÍSICA DE SEMICONDUTORES	22
4.3 FUNDAMENTOS DA FÍSICA DE SEMICONDUTORES	24
4.4 PROPRIEDADES ELÉTRICAS DOS DISPOSITIVOS SEMICONDUTORES	27
5 GUIA DO PROFESSOR	30
5.1 SUBSUNÇORES.....	30
5.2 DIFERENCIAÇÃO PROGRESSIVA.....	31
5.3 RECONCILIAÇÃO INTEGRADORA	31
5.4 MATERIAIS DE APOIO (PARADIDÁTICOS E DIVULGAÇÃO CIENTÍFICA)	31
5.4.1 Textos paradidáticos e de divulgação científica.....	31
5.4.2 Vídeos.....	31
5.4.3 Texto na Internet.....	32
6 CRONOGRAMA DE ATIVIDADES	32
7 IMPLEMENTAÇÃO DOS PROJETOS DOS ALUNOS	33
7.1 MONTAGEM DA BOBINA DE TESLA	34
7.2 MONTAGEM DO DETECTOR DE METAIS.....	36

REFERÊNCIAS	37
-------------------	----

1 Noções básicas de eletricidade e magnetismo como subsunçores ausubelianos

Depois do pré-teste, e antes da aplicação da UEPS, isto é, ao longo do primeiro semestre, o conteúdo de eletricidade e magnetismo foi apresentado em aulas não convencionais, conforme cronograma apresentado na Tabela 1. Estamos classificando essa abordagem como não convencional porque levamos em consideração os resultados do pré-teste ao trabalhar com o material contido no livro-texto (GONÇALVES FILHO; TOSCANO, 2013), ao mesmo tempo em que os alunos consultaram textos de revistas de divulgação científica, assistiram vídeos e animações, e demonstrações experimentais foram apresentadas e analisadas. Tais recursos foram utilizados com a expectativa de que essa abordagem inicial propiciasse a emergência de subsunçores relevantes, conforme pressupõe Ausubel em sua teoria de aprendizagem significativa (AUSUBEL, 1960; MOREIRA, 1979). Esperava-se também que essa estrutura de subsunçores possibilitasse a compreensão dos projetos a serem executados no segundo semestre, e que essa compreensão facilitasse a elaboração e implementação dos projetos.

Além do conteúdo do livro didático adotado (Tabela 1), os alunos tiveram, ao longo do primeiro semestre, acesso a textos de divulgação científica e vídeos, todos disponíveis na Internet e relacionados mais adiante.

Tabela 1 – Cronograma de aulas ministradas no primeiro semestre. Carga horária: 100 minutos semanais.

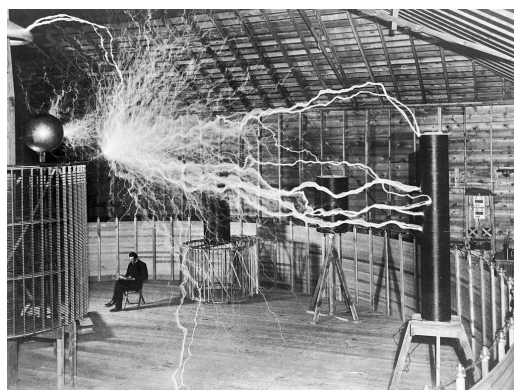
Data	Conteúdo
13/3	Apresentação geral do conteúdo a ser estudado, incluindo a apresentação da proposta de Ensino Baseado em Projeto, e que no segundo semestre os alunos deveriam elaborar e implementar dispositivos eletrônicos como parte integrante do processo avaliativo.
20/3	Conceitos Básicos de Eletrostática.
27/3	Corrente elétrica.
3/4	Resistores.
10/4	Geradores e receptores.
17/4	Noções de circuitos elétricos – parte 1.
24/4	Noções de circuitos elétricos – parte 2.
8/5	Aula experimental: alguns experimentos simples realizados com sucata tecnológica.
15/5	Campo magnético.
22/5	Força magnética.
29/5	Indução eletromagnética – parte 1.
5/6	Indução eletromagnética – parte 2.
12/6	Ondas eletromagnéticas e suas aplicações.
19/6	Divisão da turma em grupos de trabalho e apresentação dos projetos a serem desenvolvidos.
26/6	Aula experimental: alguns experimentos simples realizados com sucata tecnológica.

2 Fundamentos da bobina de Tesla

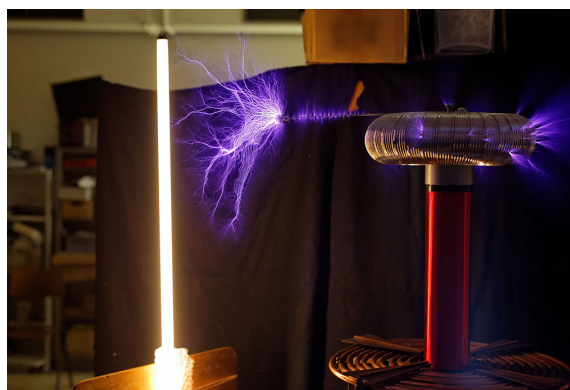
Como recurso didático ou simples demonstração para o público leigo, o registro mais antigo a respeito da bobina de Tesla recuperado pelo *Google Acadêmico* data dos anos 1950 (KELLEY; DUNBAR, 1952; MILLER, 1958), mas o uso ficou restrito até os anos 1990, quando a literatura apresenta um aumento significativo de relatos de uso no formato similar ao que foi aqui desenvolvido (BRUNS, 1992; SKELDON *et al.*, 2000). No Brasil, os primeiros registros datam de 1991 (ARRUDA; TOGINHO, 1991; LABURÚ, 1991), e o último é um interessante trabalho realizado no DF-UFSCAR (CHIQUITO; LANCIOTTI, 2000).

A profusão de vídeos atualmente existentes no *Youtube*, certamente tem a ver com o impacto que a bobina de Tesla causa em quem presencia seu funcionamento. Na Figura 1a, Tesla foi fotografado em seu laboratório, na cidade de Colorado Spring (EUA), por volta de 1899, ao lado de sua enorme bobina, capaz de gerar 12 megavolts, a uma frequência de 150 kHz e produzir uma faísca de aproximadamente 40 metros. Na Figura 1b, uma demonstração similar à que os alunos prepararam no presente trabalho, com equipamentos mais bem acabados.

Figura 1 – (a) Tesla em seu laboratório. Extraído em 20/6/2018, desse link¹. (b) Bobina de Tesla excitando o gás em tubo de neônio. Extraído em 20/6/2018, desse link².



(a)



(b)

Além desse caráter lúdico, que não deixa de ter seu valor, a bobina de Tesla, inventada por Nikola Tesla em 1891, tem posição de destaque na história da eletricidade (SANTOS, 2011)³, e

¹<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?search=tesla+coil&title=Special:Search&profile=default&fulltext=>

²[https://commons.wikimedia.org/w/index.php?search=tesla+coil+glowing+neon+tube&title=Special:Search&profile=default&fulltext=1&searchToken=baim3jhp0i7q4dxc1vev8tu5i#/media/File:225W_Tesla_coil_-_arcs4_\(cropped\).jpg](https://commons.wikimedia.org/w/index.php?search=tesla+coil+glowing+neon+tube&title=Special:Search&profile=default&fulltext=1&searchToken=baim3jhp0i7q4dxc1vev8tu5i#/media/File:225W_Tesla_coil_-_arcs4_(cropped).jpg)

³Entrevista do prof. Carlos Alberto dos Santos ao programa Fronteiras da Ciência, da Rádio da UFRGS, sobre Tesla, encontra-se em http://multimidia.ufrgs.br/conteudo/frontdaciencia/Fronteiras_da_Ciencia-T03E11-Tesla-14.05.2012.mp3.

como recurso didático permite a discussão de importantes conceitos do eletromagnetismo, conforme veremos a partir de seu circuito básico (Figura 2).

Podemos começar pela ideia de transformador, que foi objeto de uma questão no pré-teste: “Um transformador é uma das aplicações do eletromagnetismo. Para que ele serve? Descreva seu funcionamento.” No circuito da Figura 2 temos dois transformadores, o primeiro sinalizado com T, e o outro constituído pelas bobinas L1 e L2. Um fato histórico importante, é que foi no desenvolvimento de equipamentos como esse, que Tesla inventou o transformador.

Então, é interessante discutir esse circuito realizando uma espécie de confronto com as respostas dos alunos, entre as quais podemos destacar:

- ❖ um transformador transforma uma energia pequena numa energia grande;
- ❖ um transformador aumenta ou diminui a potência da energia;
- ❖ o transformador tem como objetivo não queimar o aparelho;
- ❖ o transformador controla a força e o calor da eletricidade”.

Alguns relacionaram o transformador com a tensão. Apenas um deles comentou como seria possível a elevação ou redução de uma tensão por esse dispositivo. Depois verificamos que paralelamente ao curso de ensino médio, esses alunos estavam inseridos em cursos profissionalizantes no IFCE OU SENAI.

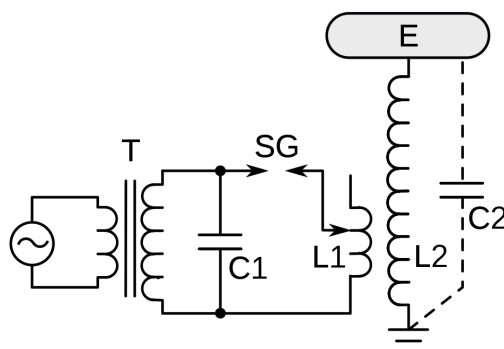
O segundo aspecto a ser destacado no circuito da Figura 2, é a possibilidade de discussão do mecanismo pelo qual se dá o aumento de voltagem nos transformadores, ou seja a discussão da lei de indução de Faraday, um fenômeno de grande relevância para incontáveis aplicações tecnológicas, e que estava presente no pré-teste: “Como uma corrente em uma bobina gera corrente em outra que não esteja a ela conectada?”

Como era de se esperar, a maioria da turma deixou essa questão em branco.

No circuito da Figura 2, E representa um toróide que normalmente é colocado nas bobinas usadas para exibição, como veremos na seção D.3e. SG significa *spark gap*, ou seja espaço de faísca, ou centelhador. C2 não é um capacitor real. É apenas a representação da capacitância distribuída no conjunto indutor L2-toróide E-terra. Embora não tenha sido colocada no circuito, também existe uma resistência distribuída, de modo que o circuito secundário é de fato um circuito RLC. Da mesma forma, o circuito primário é RLC, porque sempre existe resistência distribuído em associações de componentes elétricos, como capacitores e indutores. Valores típicos para uma bobina são, dependendo das dimensões que se deseje: (a) L1, 1 a 15 espiras; (b) L2, 50 a 1000

espiras ; (c) C1, 20 kV (JOHNSON, [S.d.]). Mais adiante veremos a equivalência desse circuito com aquele utilizado pelos alunos.

Figura 2 – Circuito básico de uma bobina de Tesla. Extraído em 20/6/2018, desse link⁴.



Embora a abordagem formal dos circuitos RL, RC e RLC não seja usual no ensino médio, noções qualitativas a respeito desses circuitos podem ser apresentadas, e a bobina de Tesla é bastante apropriada para isso. Uma forma de tratar esse tema é descrever como funciona o circuito da Figura 2. No nosso caso isso foi feito enquanto os alunos estavam envolvidos com a execução dos projetos. As equações apresentadas serviram unicamente como âncora, uma espécie de ponte intuitiva entre a abordagem qualitativa e a estrutura formal do eletromagnetismo. Em nenhum momento essas equações foram usadas operacionalmente.

Quando o circuito é ligado, o capacitor começa a ser carregado. Quanto mais carga no capacitor, maior a diferença de potencial entre suas placas. Ou seja,

$$V = \frac{q}{C}, \quad (1)$$

onde V é a diferença de potencial entre as placas, q é a carga acumulada nas placas, e C é a capacitância do capacitor, uma propriedade que depende da geometria do capacitor e do material (*dielétrico*) colocado entre as placas. Capacitores extraídos dos computadores foram usados para aprofundar essa questão da geometria e do dielétrico.

A imagem mais intuitiva que temos do capacitor é que ele é um acumulador de cargas. Se depois de acumuladas essas cargas forem liberadas, elas poderão realizar trabalho. Portanto, po-

⁴https://commons.wikimedia.org/w/index.php?search=tesla+coil&title=Special:Search&profile=default&fulltext=1&searchToken=2h9xx2creq6vmyohn1vvl880#/media/File:Tesla_coil_circuit.svg

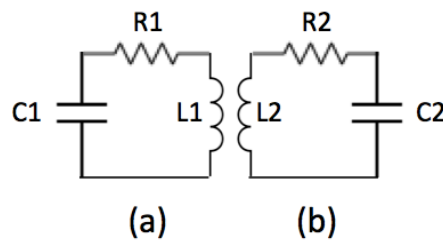
demos associar ao capacitor uma energia potencial elétrica, que depende da carga acumulada e da capacitância. Na verdade, por causa da equação (1), a energia acumulada no capacitor é dada por

$$E = \frac{CV^2}{2}. \quad (2)$$

Quando V atinge um valor capaz de quebrar a rigidez dielétrica do centelhador, SG, a corrente começa a passar pelo ramo que antes estava aberto.

No momento que o SG entra em curto, ou seja no momento em que começam a surgir as centelhas, o capacitor começa a transferir sua energia para a bobina (indutor) L1. Para discutir o fenômeno, vamos usar o circuito da Figura 3. Conforme já dissemos acima, as resistências R1 e R2, assim como o capacitor C2 não representam componentes reais, colocados no circuito. Representam componentes capacitivas e resistivas sempre presente em circuitos elétricos.

Figura 3 – Circuito agrupado da bobina de Tesla: (a) circuito primário com o centelhador em curto; (b) circuito secundário, onde encontra-se a bobina maior.



O processo de transferência de energia de C1 para L1 se faz via uma corrente elétrica. Quando essa corrente atravessa L1, ela produz um campo magnético variável em suas proximidades. Esse campo magnético variável vai atravessar L2. Pela lei da indução eletromagnética de Faraday-Lenz, a variação desse campo magnético vai induzir uma corrente através de L2, o que significa dizer que haverá uma força eletromotriz induzida proporcional à variação do fluxo do campo magnético. O valor dessa força eletromotriz, ou dessa voltagem é proporcional ao número de espiras na bobina. Como a bobina secundária tem muito mais espiras que a primária, o processo resulta em um aumento de voltagem, conforme a relação

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{N_2}{N_1}, \quad (3)$$

onde $V_{(1,2)}$ e $N_{(1,2)}$ representam, respectivamente, a voltagem e o número de espiras na bobina primária e na secundária. Embora o cálculo real seja mais complicado do que a equação (3), essa

expressão dá uma ideia dos valores. O fato é que a voltagem na bobina L2 é muito maior do que na L1.

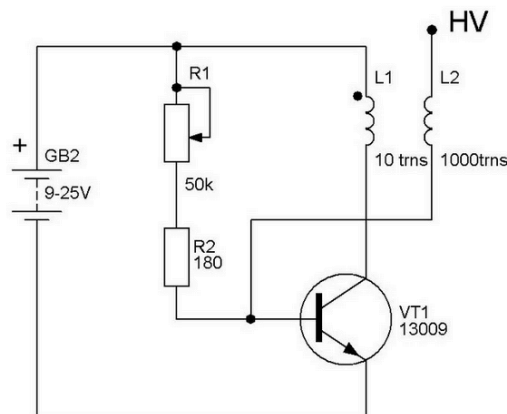
Quando C1 descarrega e a voltagem atinge o valor mínimo para quebrar a rigidez dielétrica do ar, SG abre e o processo reinicia. Ou seja, o funcionamento de uma bobina de Tesla gera pulsos de voltagem, com uma frequência que depende dos valores dos componentes utilizados no circuito, tipicamente na faixa entre 80 kHz e 500 kHz.

Cada um dos circuitos LC da Figura 3 funciona como um oscilador eletromagnético, com frequência dada pela equação 4:

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}. \quad (4)$$

A voltagem de saída das bobinas de Tesla usadas em demonstrações é tão grande que é capaz de acender uma lâmpada fluorescente colocada nas proximidades da bobina. Isso ocorre porque qualquer tubo com um gás em baixa pressão, como as lâmpadas fluorescentes e néon, apresenta descarga luminosa quando submetida a uma alta tensão, cujo valor depende, essencialmente, do tipo de gás e da pressão.

Figura 4 – Circuito de uma bobina de Tesla de estado sólido. Extraído em 20/6/2018, de <<http://www.instructables.com/id/Simple-Tesla-Coil/>>.



Para concluir esta seção, devemos chamar a atenção para um detalhe importante. O centelhador nos circuitos clássicos da bobina de Tesla serve como um chaveamento controlado por voltagem. Abre ou fecha dependendo do valor da voltagem. Então o capacitor e o centelhador funcionam como um oscilador, gerando pulsos de corrente. Isso pode ser feito de modo mais controlado e mais simples para montar, substituindo o capacitor e o centelhador por transistores 2N2222, ou BC548, ou BC337, que são osciladores de estado sólido. Então, quando o transistor está *ligado*, ou

no estado *ON*, ele deixa a corrente passar para a bobina primária. Quando ele está *desligado*, ou no estado *OFF*, a bobina libera a corrente. Esse processo gera uma corrente alternada, que por sua vez induz uma corrente alternada na bobina secundária. Ou seja tudo isso gera um campo eletromagnético oscilante nas proximidades da bobina secundária. Com essa modificação, a bobina de Tesla é geralmente denominada de bobina de Tesla de estado sólido, e o circuito é esse apresentado na Figura 4.

3 Fundamentos do detector de metais

Da mesma forma que a bobina de Tesla, o detector de metais também é muito popular na Internet. Ambos os dispositivos prestam-se à exploração de conceitos importantes do eletromagnetismo, sobretudo quando utilizados em conjunto, pois ambos têm a lei de indução eletromagnética de Faraday-Lenz como fundamento de seus funcionamentos.

Utilizamos a *Web of Science (WoS)* e o Google Acadêmico na busca que fizemos por trabalhos acadêmicos sobre esse dispositivo. Só conseguimos recuperar três referências em português relevantes para o nosso trabalho. A mais antiga é um artigo de Newton C. Braga, publicado em 1977 na Revista Saber Eletrônica (BRAGA, 1977). E a mais recente é um relatório de uma disciplina de graduação em física da Unicamp, em 2009 (SCHENKEL, 2009). A terceira referência é um trabalho do Departamento de Engenharia Eletrônica da UFMG, a respeito de ensino orientado por projeto nas disciplinas de graduação Laboratório de Eletrônica I e Laboratório de Controle I, no qual os autores afirmam que a construção de um detector de metais fez parte do programa dessas disciplinas, sem no entanto detalhar como isso se dá na prática (DONOSO-GARCIA; TÔRRES, 2007). Excetuando o artigo de Newton Braga, supra mencionado, não encontramos qualquer referência em português facilmente acessível, que descreva os fundamentos do detector de metais. Até mesmo o artigo *Detector de Metais*, disponível na versão brasileira da Wikipedia⁵ contém menos informações do que o homônimo na versão em inglês⁶.

Por outro lado, a literatura em inglês contém inúmeras referências, mas nem todas são estritamente relevantes para o nosso trabalho, uma vez que tratam de aspectos técnicos fora do escopo do presente trabalho e muito acima do nível que devemos considerar aqui. Então, fizemos uma filtragem dessa literatura e selecionamos apenas cinco artigos mais relevantes para os nossos objetivos didático-pedagógicos, quer seja por causa do contexto histórico que apresentam (TURNER,

⁵ https://pt.wikipedia.org/wiki/Detector_de_metais.

⁶ https://en.wikipedia.org/wiki/Metal_detector.

1984), pelo caráter de divulgação científica que dão ao assunto (TYSON, 2018) ou pelas abordagens didáticas (“BFO Theory”, 1999; GOLEMSHINSKI, 2015; MAHMOOD; CHIN HOCK, [S.d.]; MCNEIL, 2004; WESSELS; PALAG, [S.d.]). Quando não for indicado o contrário, o texto a seguir é baseado nessas referências.

Na bobina de Tesla, tem-se a amplificação da voltagem de entrada por intermédio da lei da indução eletromagnética de Faraday-Lenz. Como veremos na sequência, no detector de metais construído pelos alunos, tem-se a alteração de frequência por intermédio da lei de Faraday-Lenz, quando uma bobina encontra-se nas proximidades de um objeto metálico. É bastante instrutivo comparar esses dois casos de ocorrência dessa famosa lei, que constitui uma das quatro equações de Maxwell para o eletromagnetismo.

Existem três maneiras básicas de se detectar metais fazendo uso da lei de indução eletromagnética de Faraday-Lenz. Elas são conhecidas pelas siglas em inglês (TYSON, 2018): VLF, PI, BFO. Além da literatura especializada, inúmeros portais na Internet discutem esses detectores. Aos interessados recomendamos esse do Wikipédia, escrito em português⁷.

Antes de detalharmos cada uma dessas tecnologias, vejamos os fundamentos básicos que estão por trás de todas elas. Esses fundamentos também são usados na bobina de Tesla, mas na seção anterior só fizemos referência a eles naquilo que era absolutamente indispensável para a descrição qualitativa do funcionamento da bobina de Tesla. Aqui faremos uma abordagem mais detalhada desses fundamentos, em nível similar àquele dos cursos básicos de licenciatura em física (HALLIDAY; RESNICK, 1981). Não custa lembrar que essa abordagem não foi utilizada no produto educacional. Ela nos serve de guia para a devida transposição didática a ser usada em nosso projeto didático-pedagógico.

3.1 Leis de Faraday e de Lenz

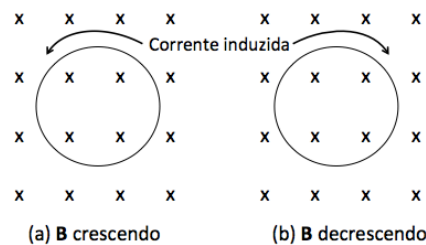
Sempre que uma espira condutora ou uma bobina constituída de N espiras for atravessada por um campo magnético variável, uma corrente elétrica surgirá por força da lei da indução eletromagnética, descoberta em 1831, praticamente ao mesmo tempo por Michel Faraday, na Inglaterra, e por Joseph Henry, nos EUA. Três anos depois, o russo Heinrich Lenz apresentou um argumento para justificar a descoberta de Faraday-Henry. Alguns autores denominam a descoberta como lei de Faraday, outros como lei de Faraday-Lenz. A Figura 5 ilustra bem a situação experimental. A es-

⁷ <https://pt.wikihow.com/Construir-um-Detector-de-Metals>

pira condutora está imóvel, enquanto o módulo do campo magnético, B , cresce com o tempo em (a) e decresce em (b).

Faraday descobriu que na situação representada na Figura 5, a corrente induzida tem sentido anti-horário quando o módulo de B cresce, e sentido horário quando B decresce. A Figura 5 pode levar a uma concepção equivocada do fenômeno. Não é exatamente a variação do campo magnético que induz a corrente na espira. É a variação do fluxo do campo magnético através da espira.

Figura 5 – Corrente induzida em função da variação temporal do campo magnético. O símbolo x representa um campo magnético, \mathbf{B} , “entrando” no plano da espira. Em (a) o módulo desse campo cresce, enquanto em (b) ele decresce. Em (a) a corrente induzida na espira tem sentido anti-horário, enquanto em (b) o sentido é horário.



Vejamos outra situação em que ocorre esse fenômeno. Por exemplo, o caso de um campo magnético estável e inhomogêneo. Ou seja, seu módulo não varia com o tempo, mas a densidade de suas linhas de campo varia no espaço, como ilustra a Figura 6. Se uma espira se desloca da região de maior densidade (Figura 6a) para a de menor, o fluxo magnético através de sua área diminui, de modo que a corrente é induzida no sentido horário. Por outro lado, se a espira se desloca no sentido contrário, de (b) para (a), o fluxo aumenta e a corrente induzida tem o sentido anti-horário.

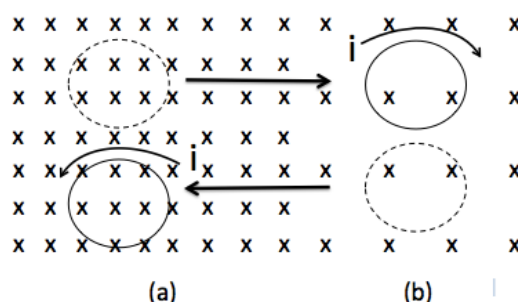
Na verdade, essa corrente surge por causa de uma força eletromotriz (fem) induzida. A partir de suas observações experimentais, Faraday estabeleceu a lei que ficou conhecida como Lei de Faraday, e que pode ser expressa assim (HALLIDAY; RESNICK, 1981, cap. 32):

A fem induzida num circuito é igual (exceto por mudança no sinal) à taxa pela qual o fluxo magnético através do circuito está mudando com o tempo.

Na forma de uma equação, essa lei é expressa assim:

$$\varepsilon = \frac{-d\Phi_B}{dt}. \quad (5)$$

Figura 6 – Campo magnético estável e espacialmente inhomogêneo. Em (a) a densidade de linhas de campo é maior do que em (b).



Lenz interpretou o significado do sinal negativo através da lei que ficou conhecida como Lei de Lenz (HALLIDAY; RESNICK, 1981, cap. 32):

Uma corrente induzida surgirá numa espira condutora fechada com um sentido tal que ela se oporá à variação que a produziu.

Vamos detalhar o experimento ilustrado na Figura 6, à luz da Lei de Lenz. Quando a espira sai de (a) para (b), diminui o fluxo do campo magnético através de sua área. Então, a corrente induzida deverá se opor a essa diminuição. Essa oposição se manifesta pela produção de um campo magnético que aumente o fluxo. Ou seja de um campo magnético que também aponte para “dentro” da folha de papel. Portanto a corrente induzida terá que ter o sentido horário, pois só assim ela cria um campo magnético que também aponta para “dentro” da folha, e reforçará o campo magnético externo, aumentando o fluxo.

3.2 Influência do meio no valor do campo magnético e nas propriedades de uma bobina

Nas seções anteriores, abordamos qualitativamente a produção de um campo magnético por uma bobina, e de como esse campo magnético induz o surgimento de uma corrente induzida em uma bobina que esteja próxima da primeira. Por sua vez, essa corrente induzida produzirá um campo magnético associado à segunda bobina.

Para entender o funcionamento de um detector de metais que faz uso do fenômeno da indução eletromagnética, é necessário responder à seguinte questão: existindo um campo magnético

em determinada região do espaço, como seu valor é alterado pela presença de determinados materiais?

Esses materiais que interferem no valor de um campo magnético são genericamente conhecidos como materiais magnéticos, e são classificados em três tipos: paramagnéticos, diamagnéticos e ferromagnéticos (MÁXIMO; ALVARENGA, 2006, cap. 23). Para discutirmos o funcionamento de um detector de metais, é suficiente fixarmo-nos nos materiais ferromagnéticos.

As propriedades magnéticas dos materiais têm origem no spin dos elétrons, e o tipo de material magnético é determinado pela sua estrutura eletrônica. No caso dos materiais ferromagnéticos todos os seus spins orientam-se no mesmo sentido, e portanto criam um campo magnético, em duas situações: quando o material está abaixo de uma certa temperatura, conhecida como temperatura de Curie do material, ou quando esse material é submetido a um campo magnético externo. Neste caso, o campo magnético externo faz surgir um campo magnético no interior do material, e este campo soma-se ao campo externo para resultar num campo muito maior. Esse é o princípio do eletroímã, quando uma barra de ferro ou outro material ferromagnético é colocada no interior de uma bobina. Essa barra concentra as linhas de força magnética e a consequência é o aumento no valor da indutância, L , da bobina⁸. Variando a indutância varia-se a frequência do circuito RLC.

Em suma, qualquer material ferromagnético colocado nas proximidades de um circuito RLC, modifica sua frequência. Esse é o fenômeno que está por trás de qualquer detector de metais.

3.3 Modelos usuais de detectores de metal

3.3.1 BFO – Oscilador de frequência de batimento

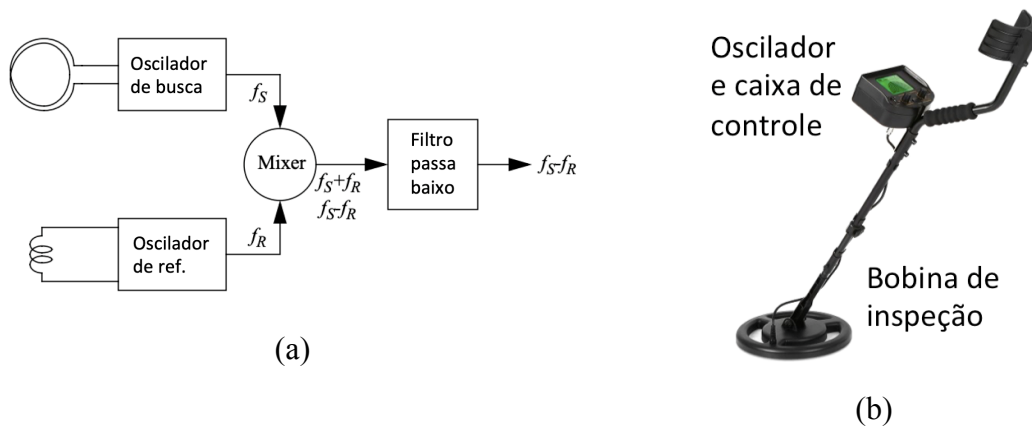
BFO é a sigla para *beat-frequency oscillator*. É a forma mais básica e intuitiva de um detector de metais. Liderou o mercado nos anos 1960-1970, mas atualmente está praticamente fora de uso profissional, embora ainda seja muito útil em atividades de ensino (“BFO Theory”, 1999). Seu princípio de funcionamento está esquematizado na Figura 7a. O sistema é composto de duas bobinas (osciladores) e de uma eletrônica associada. Como o nome sugere, a bobina de inspeção é colocada nas proximidades do local onde supostamente encontra-se o metal, e a bobina de referência é quem gera o sinal que vai indicar ou não a presença do metal. Essa bobina de referência junta-

⁸ Uma discussão mais detalhada do que a do livro de Antônio Máximo e Beatria Alvarenga, encontra-se neste endereço: <<https://www.allaboutcircuits.com/textbook/direct-current/chpt-15/factors-affecting-inductance/>>, acessado em 20/6/2018.

mente com a eletrônica associada são instaladas numa caixa que fica na parte superior do detector (Figura 7b).

Uma corrente gerada pelo sistema eletrônico percorre as duas bobinas, de tal modo que sejam iguais as suas frequências de oscilação eletromagnética (equação D.4). O sistema eletrônico capta e compara os sinais de cada um desses osciladores, de modo a isolar o sinal correspondente à diferença de frequência. Como no início da operação as duas frequências são iguais, não há sinal. Quando a bobina de inspeção aproxima-se de um metal, sua indutância altera-se, como discutido acima, e em consequência sua frequência (equação D.4) muda. O sistema eletrônico é construído de tal modo que uma pequena diferença de frequência gere um sinal audível, por exemplo entre 500 Hz e 1 kHz.

Figura 7 – Detector de metais BFO: (a) circuito básico, extraído de (“BFO Theory”, 1999); (b) equipamento comercial, extraído de <<https://popular.reviews/metal-detector/>>, em 20/6/2018.



3.3.2 VLF – Balança de indução

VLF é a sigla para *Very Low Frequency*, também conhecido como balança de indução. Provavelmente é a tecnologia mais popular em uso atualmente (TYSON, 2018). As duas bobinas são colocadas concêntricamente, no mesmo plano (Figura 8). A bobina externa é denominada bobina transmissora, e a interna é a receptora. Uma corrente alternada circula na bobina externa, e poderia por indução eletromagnética gerar outra corrente alternada na bobina interna. No entanto a bobina interna é blindada em relação ao campo magnético criado pela bobina externa. Então, o sistema funciona assim: o campo magnético oscilante da bobina externa orienta os domínios magnéticos

dos materiais a serem detectados, fazendo com que esses materiais criem um pequeno campo magnético oscilante. É esse pequeno campo magnético induzido que a bobina interna capta por meio de uma corrente elétrica induzida. Essa informação é enviada para o sistema eletrônico de controle. Uma característica interessante desse sistema, é que ele possibilita a distinção de diferentes tipos de metais, mas os fundamentos desse processo estão muito acima do nível da disciplina e não foram discutidos com os alunos.

Figura 4.8 – Detector de metal VLF comercial, extraído de <<http://www.westcoastminingsupply.com/bounty-hunter/the-metal-detector-vlf>>, em 20/6/2018.



3.3.3 PI – Indução de pulso

Trata-se de um modelo não muito usual, e que funciona com um complexo sistema eletrônico para geração e controle de pulsos rápidos e potentes (Figura 9). Ao contrário dos modelos anteriores, o detector PI funciona com uma única bobina, que serve como transmissora e receptora. Quando cada pulso termina, há uma autoindução na bobina do sistema, gerando um pulso de corrente rápido, de aproximadamente 30 microssegundos (TYSON, 2018), denominado *pulso refletido*. Um detector PI típico, é capaz de produzir cerca de 100 pulsos por segundo.

Figura 9 – Detector de metal PI comercial, extraído de <<https://www.hobby-hour.com/electronics/s/surfinmaster-pi-metal-detector.php>>, em 20/6/2018.



Se o detector estiver acima de um material magnético, ele induz um campo magnético no material que é oposto ao gerado pelo detector. A consequência disso, é que o campo magnético induzido no material vai fazer com que o próximo pulso refletido seja mais longo. É um fenômeno similar ao eco. Então, o sistema eletrônico analisa o tamanho dos pulsos refletidos. Se esse tamanho aumentar, é porque existe material magnético sob a bobina do detector.

3.4 Detector de metais com circuito integrado 555

Os dois modelos de detectores mais comuns, o BFO e o VLF funcionam com princípios similares. Existem duas bobinas, uma transmissora e uma receptora. Essas bobinas constituem osciladores eletromagnéticos, de modo que uma corrente em uma delas gera corrente induzida na outra, que é a bobina usada para detectar o metal. Os dois osciladores estão eletronicamente acoplados, de modo que na ausência de material magnético eles oscilam na mesma frequência. Na presença de material magnético, os osciladores oscilam com frequências diferentes, fato que é identificado pelo sistema de controle eletrônico.

Algo parecido com isso pode ser feito com uma única bobina sensora e um circuito integrado que funcione como oscilador. Foi essa alternativa que os alunos escolheram, depois de pesquisas na Internet. O circuito integrado mais usado para isso é o 555, amplamente discutido na literatura especializada (GOYAL, 2015) e na Internet⁹.

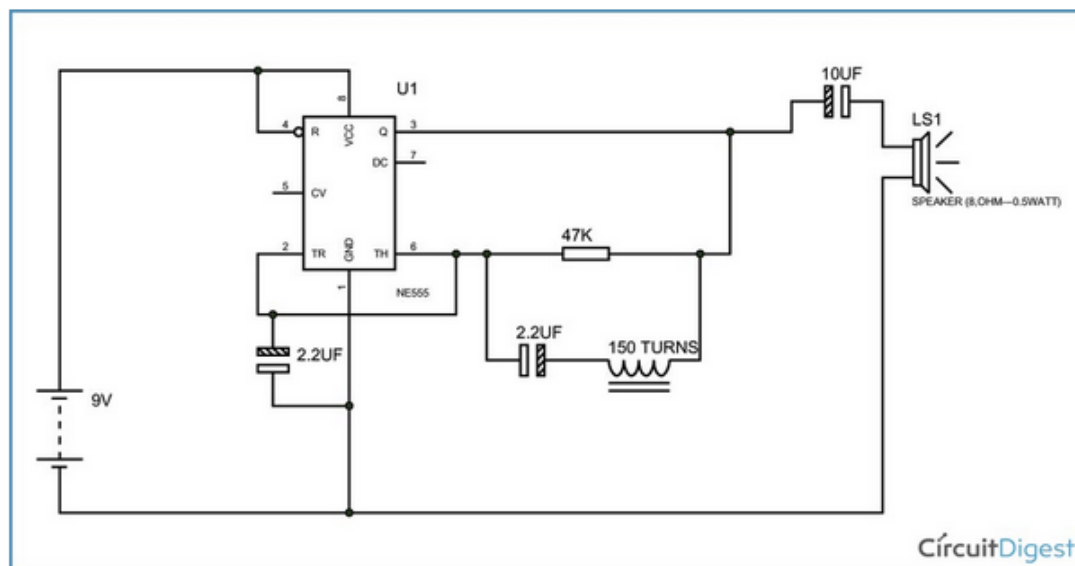
O circuito básico de um detector de metais com CI 555 é apresentado na Figura 10. Nessa proposta, a bobina de detecção, construída com 150 espiras, faz parte de um circuito RLC, com $R=47\text{ k}\Omega$ e $C=22\text{ }\mu\text{F}$. Vejamos como funciona esse circuito.

O CI 555 funciona como um gerador de onda quadrada, com frequência na faixa audível aos humanos. O circuito RLC tem uma frequência ajustável para um certo valor quando está na ausência de material condutor no interior da bobina. Conforme discutido acima, se um material metálico for colocado no interior ou nas proximidades da bobina, sua indutância, L , aumenta, variando a frequência do circuito RLC. O resultado é outro tipo de som emitido pelo autofalante.

Portanto, o princípio de funcionamento desse detector é exatamente o mesmo dos dois primeiros descritos acima.

⁹ https://en.wikipedia.org/wiki/555_timer_IC, acesso em 21/6/2018; <http://www.circuitstoday.com/555-timer#block-diagram>, acesso em 21/6/2018.

Figura 10 – Circuito básico de um detector de metais com CI 555, extraído de <<https://circuitdigest.com/electronic-circuits/simple-metal-detector-circuit>>, em 20/6/2018.



4 Noções de ciência e tecnologia de semicondutores

O material que aqui apresentaremos é baseado em três referências: (i) Capítulo 46 do Halliday-Resnick (vol. 4), *Condução de eletricidade em sólidos* (HALLIDAY; RESNICK, 1991); (ii) Capítulo 4 da Coleção Quanta Física, *Estrutura da matéria e propriedades dos materiais* (MENEZES *et al.*, 2010); (iii) Capítulo 3 do livro *Energia e Matéria: da fundamentação conceitual às aplicações tecnológicas, Da micro à nanoeletrônica* (SANTOS, 2015).

4.1 Introdução

Não é exagero dizer que a sociedade contemporânea não suportaria viver sem a presença dos circuitos integrados. Praticamente não há um dispositivo tecnológico que não faça uso desse artefato minúsculo, cujo componente operacional só pode ser visualizado com a ajuda de microscópio. O principal componente operacional, o sistema nervoso de um circuito integrado, é um transistor, ou uma associação de transistores.

Antes de continuar, talvez seja interessante chamar a atenção para a nomenclatura. Na linguagem cotidiana, circuito integrado é conhecido como CI. Na literatura inglesa é IC, de *integrated circuit*. Como os CI deram origem aos *chips*, alguns profissionais referem-se aos *chips* quando

estão falando de CI. Ou seja *chip* e CI são a mesma coisa. Mas, nosso foco aqui não é o *chip*, é o transistor.

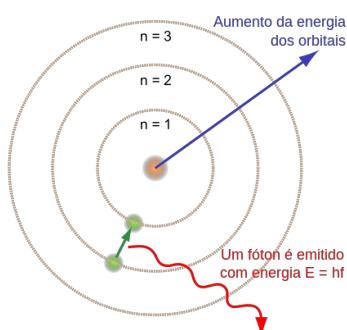
Para alguns alunos do ensino médio, conhecer o transistor será obrigação profissional, para outros será uma forma de aumentar seu universo cultural. É importante ter noção do que seja esse componente que tem tanta influência em nossas relações sociais e em nossa vida econômica.

4.2 Antecedentes históricos da física de semicondutores

A física de semicondutores surgiu na virada dos anos 1920 para os anos 1930, e só foi possível graças ao desenvolvimento da mecânica quântica. Não podemos tratar esse assunto detalhadamente porque exige uma matemática que não é dominada por alunos do ensino médio. É necessário no mínimo conhecer cálculo diferencial e integral, algo que se aprende em cursos avançados na universidade. Mas, podemos abordar os conceitos fundamentais. Faremos isso em duas partes. Na primeira parte trataremos dos avanços da física que permitiram o surgimento da teoria quântica, e na segunda parte trataremos dos conceitos específicos da física de semicondutores.

A imagem que hoje temos do átomo, com um núcleo minúsculo em torno do qual gravitam os elétrons, surgiu entre 1908 e 1913, com trabalhos experimentais de Ernest Rutherford e trabalhos teóricos de Niels Bohr. Ficou conhecido como modelo atômico de Rutherford-Bohr, ou simplesmente modelo de Bohr.

Figura 11 – Ilustração do modelo de Rutherford-Bohr. Extraído em 14.4.2017 de https://commons.wikimedia.org/wiki/Category:Bohr_model#/media/File:Bohr_atom_model-pt.svg.



A Figura 11 é uma boa ilustração do modelo de Rutherford-Bohr. Os círculos enumerados, $n=1$, $n=2$, etc., representam as órbitas nas quais os elétrons podem ser encontrados. Um dos postulados de Bohr é que os elétrons nessas órbitas não emitem qualquer radiação. Um elétron só emite

alguma radiação quando pula de uma órbita para outra mais interna, ou seja mais próxima do núcleo atômico. Para fazer o caminho inverso, ou seja saltar de uma órbita para outra mais externa o elétron precisa receber energia.

Em suma, a situação é assim:

1. O átomo é constituído de um núcleo, contendo praticamente toda a massa atômica, em volta do qual movimentam-se elétrons em órbitas bem definidas, cujas distâncias ao núcleo depende da quantidade elétrons do átomo.
2. Enquanto movimentam-se nessas órbitas, os elétrons não emitem radiação, ou energia, o que dá no mesmo, pois a radiação emitida transporta energia. Eles podem apenas absorver energia.
3. Se o elétron absorve energia ele pode responder de três modos diferentes:
 - a. Liberando-se do átomo, se a energia recebida for igual ou superior à energia da órbita em que ele se encontra.
 - b. Saltando para uma órbita mais externa, se a energia recebida for exatamente a diferença entre as energias das duas órbitas.
 - c. Vibrando e aquecendo o átomo, mas permanecendo na mesma órbita, se a energia recebida não permitir as situações previstas em (a) e (b).
4. Ao absorver energia e saltar para uma órbita mais externa, o elétron permanece nessa órbita por um tempo de aproximadamente 10^{-8} segundos, ou 0,1 nanossegundos. Depois disso ele retorna à sua órbita original.
5. Esse retorno pode ser realizado de uma única vez, diretamente para a órbita original, ou em sequência, de órbita em órbita até chegar na órbita original.
6. Cada vez que o elétron salta para uma das órbitas internas, o átomo emite uma radiação cuja energia é a diferença entre as energias das duas órbitas.

Esse modelo simplificado do átomo, elaborado por Rutherford e Bohr, evoluiu para um modelo mais realista, a partir dos estudos teóricos que resultaram na mecânica quântica, principalmente os trabalhos de Erwin Schrödinger e Werner Heisenberg, elaborados por volta de 1925. As órbitas foram transformadas em camadas, com níveis e subníveis de energia, e essas foram em seguida denominadas de bandas de energia. Foi o estudo da teoria de bandas que permitiu o surgimento do que hoje conhecemos como física de semicondutores.

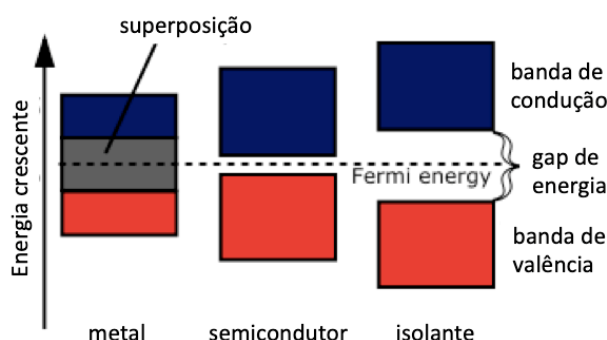
4.3 Fundamentos da física de semicondutores

Podemos dizer que qualquer material sólido tem duas bandas, uma de valência e outra de condução. A partir disso, podemos classificar os materiais em três categorias: isolantes, condutores e semicondutores. Há uma quarta categoria, os supercondutores, mas esses têm propriedades físicas bem diferentes dos três primeiros, de modo que para os objetivos desse texto podemos deixá-los de lado.

A Figura 12 ilustra as configurações de bandas em metais, semicondutores e isolantes. Os isolantes são também conhecidos como dielétricos. Para entender por que essas configurações são assim há que se ter conhecimentos de teoria quântica. Mas, para compreender em linhas gerais o que se discutirá a seguir é suficiente termos em mente o seguinte:

1. As bandas de valência (BV) e de condução (BC) se superpõem nos metais e são separadas nos semicondutores e nos isolantes.
2. A separação energética entre as bandas, é maior nos isolantes do que nos semicondutores.

Figura 12 – Representação esquemática das bandas de valência e de condução de metais, semicondutores e isolantes. Adaptada de <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Energy_band1.svg?uselang=pt-br>. Acesso em 20/5/2019.



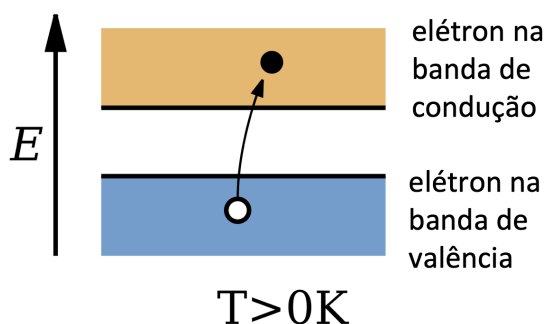
Vamos analisar o que está por trás da Figura 12 em termos de conceitos físicos. Em primeiro lugar percebe-se que a principal diferença entre semicondutores e isolantes é a separação energética, também conhecida como *gap* de energia. O *gap* de energia é maior nos isolantes do

que nos semicondutores. A palavra inglesa *gap* é usada aqui como sinônimo de intervalo. Na verdade, refere-se a um intervalo de energia proibida. Ou seja, entre o ponto mais alta da banda de valência e o ponto mais baixo da banda de condução há uma região de energia proibida, ou simplesmente banda proibida. Nenhum elétron pode ser encontrado nessa região.

Qualquer que seja o material, metais condutores, semicondutores e isolantes, só existe condução elétrica se houver elétrons na banda de condução. Observe que nos metais condutores, essa banda superpõe-se à banda de valência. Logo, sempre haverá elétron na banda de condução, disponível para conduzir eletricidade. É por isso que os metais condutores, como ferro, níquel, cobre, entre outros, são conhecidos como bons condutores de eletricidade, e também de calor.

De um modo geral, os elétrons nos semicondutores e isolantes são encontrados na BV. Então, se a corrente elétrica exige a presença de elétrons na BC, semicondutores e isolantes não podem conduzir eletricidade? Aí é que está a grande questão que deu origem à moderna tecnologia eletrônica. Tanto um tipo de material como o outro pode conduzir, se for possível levar elétrons da BV para a BC. Como a separação entre as bandas é muito grande nos isolantes, esses materiais dificilmente conduzem eletricidade. Então vamos concentrarmo-nos nos semicondutores, materiais que estão na parte superior direita da tabela periódica (colunas 3A a 6A) sendo Silício (Si) e Germânio (Ge) os mais famosos.

Figura 13 – Transição da banda de valência para a de condução de um material semiconductor. Adaptada em 14/4/2017, desse link¹⁰.



Existem diferentes maneiras de transferir um elétron da BV para a BC de um semiconductor, incluindo o aquecimento do mesmo, mas as duas formas mais utilizadas, são pela aplicação de uma voltagem e pela iluminação. Dependendo do tipo de material semiconductor, há necessidade

¹⁰https://commons.wikimedia.org/w/index.php?title=Special:Search&limit=20&offset=20&profile=default&search=conduction+band&uselang=pt-br&searchToken=69hrypazhfku42fk963fo8eyo#/media/File:Semiconductor_Bands_Hot.svg

de luz com diferentes frequências. Qualquer que seja o modo de transferência, a situação final é a mesma como ilustrada na Figura 13.

Uma vez na BC, o elétron pode se mover e produzir corrente elétrica. Observe que ao saltar para a BC, o elétron deixou um buraco, ou lacuna, na BV. E essa lacuna também é móvel, de modo que produz uma corrente na BV. Essa corrente de lacunas funciona como se fosse uma corrente de cargas positivas, portanto em sentido contrário à corrente de elétrons. Esses dois fluxos de correntes em sentidos contrários é uma peculiaridade dos semicondutores, que se assemelha aos sistemas iônicos. Mas a natureza das correntes de cargas positivas nos sistemas iônicos é diferente dessa nos semicondutores.

Em quase todos os materiais utilizados para a fabricação de dispositivos eletrônicos, os elétrons são transferidos por meio da aplicação de uma voltagem, cujo valor depende da largura do *gap* de energia, e este depende do tipo de material. Por exemplo, para o silício puro, será necessário aplicar uma voltagem da ordem 1,12 volt, enquanto no germânio basta 0,66 volt. Além dos elementos semicondutores, existem compostos semicondutores, como o arseneto de gálio (GaAs), o antimoneto de índio (InSb), entre outros.

Os semicondutores puros, ou naturais, também conhecidos como **semicondutores intrínsecos**, são de pouca utilidade tecnológica por duas razões: têm poucos elétrons disponíveis para condução. Tecnicamente se diz que têm baixa concentração de portadores. Além disso, essa concentração depende muito da temperatura. Estudos realizados nos anos 1940 mostraram que a dopagem com uma pequena concentração de impurezas especialmente selecionadas era capaz de aumentar a concentração de portadores, e ao mesmo fazer com que as propriedades elétricas dos semicondutores fossem menos dependentes da temperatura. Os semicondutores dopados passaram a ser denominados **semicondutor extrínseco**. Foi essa descoberta que permitiu o avanço da microeletrônica a partir de 1950.

Existem dois tipos de dopagem. Uma que aumenta a concentração de elétrons, ou de portadores negativos e uma que aumenta a concentração de lacunas, ou portadores positivos. No primeiro tipo tem-se semicondutor tipo-n, e no segundo tipo de dopagem tem-se semicondutor tipo-p.

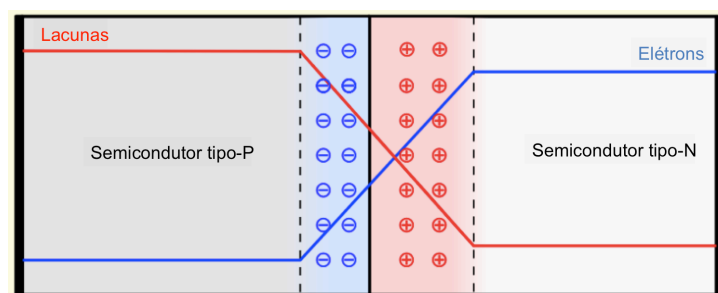
4.4 Propriedades elétricas dos dispositivos semicondutores

A história da descoberta do transistor, o dispositivo semicondutor que abriu as portas para a microeletrônica é muito longa para ser tratada aqui. O que importa aqui é compreender o funcionamento desse dispositivo, o coração de qualquer equipamento eletrônico moderno.

Tudo começa com a junção p-n, ou diodo, o primeiro dispositivo semicondutor fabricado. A junção se forma quando determinado semicondutor é dopado em lados opostos com impurezas tipo p e n. Como ilustra a Figura 14, no semicondutor tipo p há um excesso de lacunas, enquanto no semicondutor tipo n há um excesso de elétrons. O excesso de lacunas no lado p migra na direção do lado n e o excesso de elétrons no lado n migra na direção do lado p. Na interface entre as duas regiões, elétrons e lacunas se recombinam, deixando uma faixa de íons positivos no lado n e outra de íons negativos no lado p. Essa região é conhecida como região de carga espacial (por causa das cargas dos íons), ou região de depleção, por faltarem elétrons e lacunas, que se recombinaram.

Em determinado momento o processo de difusão cessa e o sistema entra em equilíbrio. O processo cessa porque os íons positivos empurram as lacunas para o lado p, e os íons negativos empurram os elétrons de volta para o lado n. Dito de outro modo, os íons formam uma barreira de potencial na interface. É uma espécie de capacitor, com um campo elétrico dirigido do lado n para o lado p, como ilustra a Figura 15.

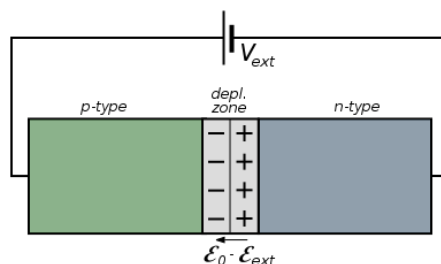
Figura 14 – Representação esquemática de uma junção p-n. Adaptado de <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Pn-junction-equilibrium.png?uselang=pt-br>. Acesso em 14.4.17.



Qualquer dispositivo semicondutor moderno tem milhares de junções p-n, e cada um tem funcionamento diferente, dependendo do tipo de material utilizado, da quantidade de junções p-n, da forma como são configuradas, etc, mas, na essência, todos têm o mesmo princípio de funcio-

namento, que será explicado a seguir a partir do diodo, o primeiro e mais simples dispositivo semicondutor inventado¹¹.

Figura 15 – Junção p-n em polarização direta. <https://commons.wikimedia.org/wiki/Category:PN-junction_diagrams?uselang=pt-br#/media/File:Forward-Biased_pn_Junction.svg>. Acesso em 16.04.17.



Temos duas maneiras de ligar uma bateria ou pilha a um diodo (Não custa lembrar, tudo que se diz aqui sobre o diodo, essencialmente vale para o transistor e outros dispositivos semicondutores):

1. Conectando o polo positivo da bateria no terminal tipo-p, e o negativo no terminal tipo-n. Essa ligação é denominada **polarização direta** (Figura 15).
2. A outra maneira é o inverso da anterior. Ou seja, polo positivo no terminal tipo-n e polo negativo no terminal tipo-p. Essa é a **polarização reversa** (Figura 16).

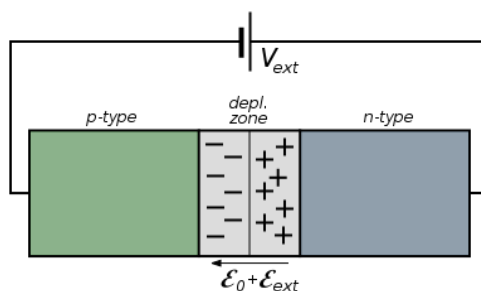
O que ocorre na polarização direta pode ser assim resumido:

1. Do terminal negativo saem elétrons em direção à junção no lado do semicondutor n.
2. O terminal positivo remove elétrons do semicondutor p, deixando lacunas que migram para a interface.
3. Se a voltagem da bateria for superior à barreira de potencial da junção, elétrons e lacunas se aniquilam na interface e abrem espaço para mais elétrons e lacunas. É assim que surge a corrente. Ou seja, a corrente inicia quando a voltagem aplicada é superior à barreira de potencial da junção.

¹¹ Para mais detalhes, em linguagem para leigos, sugere-se esses artigos da Ciência Hoje Online: http://www.cienciahoje.org.br/noticia/v/ler/id/2946/n/a_cereja_no_bolo_da_microeletronica; http://www.cienciahoje.org.br/noticia/v/ler/id/3020/n/o_fantasminha_camarada_da_microeletronica.

A barreira de potencial da junção é similar ao *gap* de energia que existe nos semicondutores intrínsecos. Nesses semicondutores, a corrente só inicia quando a voltagem é superior ao *gap*, assim como no diodo a corrente só inicia quando a voltagem é superior à barreira de potencial.

Figura 16 – Junção p-n em polarização reversa. <https://commons.wikimedia.org/wiki/Category:PN-junction_diagrams?uselang=pt-br#/media/File:Reverse-Biased_pn_Junction.svg>. Acesso em 16.04.17.



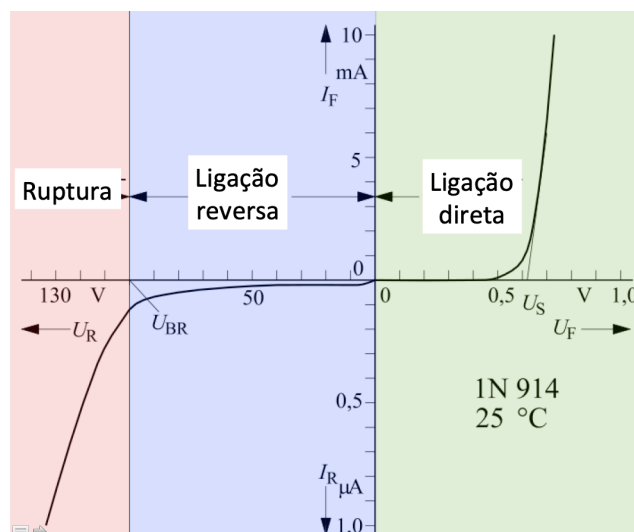
Se a junção for ligada no sentido contrário, ou seja na polarização reversa (Figura 16), o que acontece pode ser assim resumido:

1. As lacunas no lado-p são atraídos pelo polo negativo, e os elétrons no lado-n são atraídos pelo polo positivo.
2. Isso implica no aumento da barreira de potencial maior. Tem uma explicação física para isso, mas não importa aqui. O que importa é ter em mente que sendo a barreira de potencial muito mais larga, a bateria não terá condições de produzir corrente no circuito.
3. Todavia, chega um momento em que elétrons e lacunas penetram na região de depleção e são fortemente acelerados. Ao chocarem-se com átomos nessa região, iniciam uma avalanche que origina a corrente de ruptura.

As duas situações são ilustradas na Figura 17 para o caso do famoso diodo 1N914. A polarização direta está representada pela curva no lado positivo da voltagem, em verde, enquanto a polarização reversa está no lado negativo. A avalanche, ou ruptura, momento em que o diodo é danificado, está representada pela curva na área rosada.

Portanto, nos diodos e nos seus sucedâneos, como os diferentes tipos de transistores, a corrente circula praticamente em uma única direção.

Figura 17 – Curva IxV para o diodo 1N914. https://commons.wikimedia.org/wiki/Category:PN-junction_diagrams?uselang=pt-br#/media/File:Kennlinie_Diode_1N914.svg. Acesso em 17.4.17.



5 Guia do Professor

Até aqui apresentamos aspectos conceituais referentes ao material que foi transposto para a sala de aula por meio da UEPS. A partir desse momento vamos apresentar a sequência didática propriamente dita. Ao final do documento é apresentado o cronograma de atividades.

5.1 Subsunçores

Ao longo das atividades, algumas questões são levantadas e discutidas, de modo a proporcionar o estabelecimento de subsunçores relevantes para os projetos (bobina de Tesla e detector de metais). Exemplos de questões:

1. Onde podemos encontrar circuitos elétricos?
2. Todos os circuitos elétricos são iguais? O que os faz ser diferentes?
3. A eletricidade e o magnetismo são dois ramos individuais da Física ou estão inter-relacionados?
4. Existem outras ciências que se dedicam ao estudo dos circuitos elétricos?

Todos esses questionamentos devem ser debatidos em sala sobre a condução do professor de modo que se faça o registro dos pontos mais relevantes e que se possa fazer uma sondagem eficiente acerca dos conhecimentos prévios dos estudantes. Nesse primeiro momento é importante que o professor faça anotações individualizadas acerca dos posicionamentos de cada um dos estudantes de modo que tais anotações possam traduzir de fato se existem conceitos formais acerca do estudo dos circuitos elétricos e detectar concepções alternativas.

5.2 Diferenciação progressiva

O estudo das propriedades dos componentes retirados dos computadores, seguido do estudo desses componentes em circuitos elétricos simples, concluindo com a discussão de dispositivos eletrônicos de uso diário, e tendo como referencial artigos de divulgação científica, vídeos e animações, funciona como o processo da diferenciação progressiva propugnada por Ausubel.

5.3 Reconciliação integradora

Na fase final da intervenção didática, o professor deverá organizar um processo de reconciliação integrativa a partir de uma síntese de todos os resultados obtidos pelos alunos, quer seja no campo material (execução dos projetos) ou no campo conceitual (apropriação de forma significativa dos conceitos fundamentais). Essa avaliação feita pelo professor deverá ser compartilhada com toda a turma. Este é o momento que a turma tem para demonstrar sua capacidade para reconciliar integrativamente os conceitos trabalhados durante a execução do projeto. Esta etapa será finalizada com a apresentação dos equipamentos confeccionados.

5.4 Materiais de apoio (paradidáticos e divulgação científica)

Utilizamos os materiais de apoio apresentados abaixo, que consideramos relevantes, mas cada professor por buscar materiais alternativos.

5.4.1 Textos paradidáticos e de divulgação científica

1. SANTOS, C.A. dos. Um desafio e tanto. *Ciência Hoje Online*, 6/6/2014. <http://cienciahoje.org.br/coluna/um-desafio-e-tanto/>.
2. _____. Uma história de sorte e sagacidade. *Ciência Hoje Online*, 27/2/2009. <http://cienciahoje.org.br/coluna/uma-historia-de-sorte-e-sagacidade/>.
3. KOEHLER, I.D., FARIAS, Y., CARVALHO, V.T. de, SCHMIDT, A., KOEHLER, M.D. Desenvolvimento de um mini-aspirador para teclado com lixo eletrônico para reduzir os impactos ambientais. Disponível em <<https://siaiap32.univali.br/seer/index.php/acotb/article/download/10788/6120>>. Acesso em 5/7/2017.
4. GONZALES, E.G., ROSA, P.R.S. Aprendizagem significativa de conceitos de circuitos elétricos utilizando um ambiente virtual de ensino por alunos da educação de jovens e adultos. *Investigação em Ensino de Ciências*, v.19, n.2, pp.477-504, 2014. Disponível em <<https://www.if.ufrgs.br/cref/ojs/index.php/ienci/article/view/91>>. Acesso em 5/7/2017.

5.4.2 Vídeos

1. Prof. Álvaro – Eletromagnetismo. <https://www.youtube.com/watch?v=DJBu0WGPw4U>.
2. Canal XProjetos – Detector de metais. <https://www.youtube.com/watch?v=YDQdtctWBbs>.
3. Marlon Nardi – Bobina de Tesla. <https://www.youtube.com/watch?v=uA46GPy0qQ0>.

4. TVU Notícias – Projeto do IFRN coleta Lixo Eletrônico para descarte adequado.
<https://www.youtube.com/watch?v=Lp9iQUO-Oo>.
5. Manual do Mundo – 10 coisas para fazer com computador velho.
<https://www.youtube.com/watch?v=VO3YwlqlyC0>.

5.4.3 Texto na Internet

1. Instituto NCB – Detector de metais.
<http://www.newtoncbraga.com.br/index.php/eletronica/57-artigos-e-projetos/11152-detector-de-metais-art2624>.

6 Cronograma de atividades

Aula	Atividade
1	Apresentação e detalhamento das atividades a serem desenvolvidas ao longo do projeto
2	Aplicação do teste SMA.
3	Os dispositivos a serem construídos são apresentados: uma bobina de Tesla e um detector de metais. Os conceitos pertinentes aos projetos são abordados a título de introdução. Ao final da aula os estudantes são levados ao almoxarifado da escola para o primeiro contato com a matéria-prima a ser utilizada nos projetos: computadores abandonados.
4	Por sorteio, as equipes são divididas em grupos. É definida a agenda de execução dos projetos.
5	Início da desmontagem dos computadores. Cada equipe tinha o seu equipamento para desmontar.
6	Os componentes são separados e suas propriedades são estudadas.
7	Os componentes são estudados a partir de possibilidades de circuitos elétricos.
8	É apresentado um vídeo com noções de eletrônica.
9	Aula sobre soldagem.
10	Discussão sobre os projetos, com ênfase no contexto histórico de cada um.
11	Discussão sobre a problemática do lixo eletrônico.
12	São apresentados textos e vídeos sobre o lixo eletrônico.
13	Discussão sobre um vídeo e um informativo que cada grupo deverá produzir para apresentar em uma reunião na escola, envolvendo pais, funcionários e estudantes das demais séries.
14	Reunião na escola para apresentação dos trabalhos informativos sobre a problemática do lixo eletrônico.
15	Retorno aos trabalhos em grupo para a continuação do desenvolvimento dos projetos.
16	Avaliação dos conceitos trabalhados, com questões de múltipla escolha e questões dissertativas.
17	Oficina para discussão do andamento dos projetos. As equipes mais adiantadas são incentivadas a tirarem dúvidas daquelas que enfrentam dificuldades com a execução do projeto.

18	Os resultados da avaliação são discutidos e debatidos em sala de aula.
19	Os resultados da avaliação são discutidos e debatidos em sala de aula.
20	Apresentações dos projetos.
21	Avaliação da UEPS.

7 Implementação dos projetos dos alunos

Essa etapa do projeto teve início no segundo semestre, com a aplicação do teste SMA (SILVEIRA; MOREIRA; AXT, 1989) para investigar as concepções alternativas dos alunos em relação a circuitos elétricos simples, cujos resultados, publicados recentemente (ANDRADE *et al.*, 2018). Ao longo do primeiro semestre os alunos tiveram aulas convencionais de eletricidade e magnetismo, a partir no livro-texto adotado na escola (GONÇALVES FILHO; TOSCANO, 2013) e dos materiais suplementares relacionados acima, na seção 5.4.

A UEPS foi aplicada depois do teste SMA, conforme sequência de eventos apresentada na seção anterior. A turma foi dividida em cinco grupos, cada um com seis alunos. Coube a três grupos o desenvolvimento de uma bobina de Tesla, e aos outros dois, o desenvolvimento de um detector de metais, ambos os projetos deveriam ser realizados com componentes extraídos de computadores fora de uso no almoxarifado da escola.

Figura 17. – Fase de desmontagem dos computadores.



À medida que os componentes iam sendo extraídos dos computadores (Figura 17), questões discutidas no primeiro semestre eram retomadas. Paralelamente à retirada dos componentes, os alunos realizavam buscas na Internet a respeito dos equipamentos que deveriam montar, e discutíamos a viabilidade de cada proposta que encontravam. Tínhamos também o nosso grupo de whatsapp para troca de informações.

Para simplificar nossas atividades, decidimos que os grupos utilizariam o mesmo circuito para cada um dos equipamentos. Para a confecção da bobina de Tesla decidimos seguir o vídeo disponível neste endereço¹², enquanto para o detector de metais optamos por este¹³, embora outra boa alternativa encontra-se neste endereço¹⁴.

Ao mesmo tempo em que trabalhavam no planejamento e execução de seus projetos, os alunos tinham aulas, frequentemente no laboratório. Como os conceitos básicos pertinentes aos projetos haviam sido discutidos no semestre anterior, as aulas no laboratório eram bem práticas, com identificação de componentes, montagens, soldas, circuitos elétricos básicos, funcionamento de instrumentos de medidas. Na sala de aula os grupos se reuniam e discutíamos conceitos teóricos diretamente ligados aos projetos. Durante todo o período de nossa intervenção didática, ocorreu uma intensa interação entre os alunos, com reuniões no ambiente escolar e fora da escola. Nesse processo interativo, os grupos mais adiantados ajudavam aqueles que enfrentavam maiores dificuldades.

Aproximadamente na metade do semestre, quando alguns grupos estavam mais adiantados do que outros, organizamos uma oficina para uma discussão geral do andamento dos projetos. Os alunos desses grupos mais adiantados passaram dicas para que os outros superassem suas dificuldades.

Quando todos os projetos foram concluídos, realizou-se um sorteio para a ordem de apresentação do trabalho realizado por cada grupo. A apresentação dos projetos foi realizada em uma das últimas aulas. Cabe destacar a colaboração entre as equipes nos dias que antecederam a apresentação dos projetos.

7.1 Montagem da bobina de Tesla

O circuito da bobina de Tesla é similar àquele apresentado na Figura 4, confeccionado com os seguintes componentes:

1. Bateria de 9 volts.
2. Lâmpada Fluorescente para teste.
3. Transistor 2N2222.
4. Resistor de 22k (vermelho, vermelho, laranja, dourado) ou 27k cor (vermelho, violeta,

¹² <https://www.marlonnardi.com/p/como-fazer-uma-mini-bobina-de-tesla.html>.

¹³ <https://www.youtube.com/watch?v=T2el8gmRsx0&feature=youtu.be>.

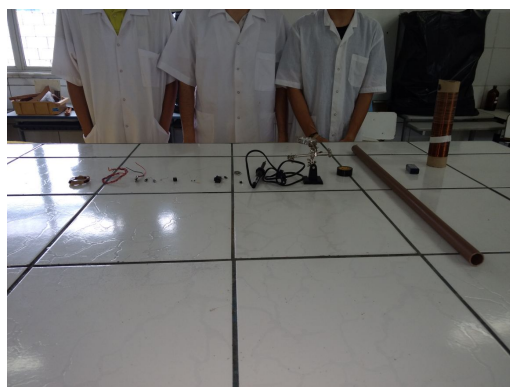
¹⁴ <http://www.bahiaemfocos.com.br/comofazeremcasa/como-fazer-um-detector-de-metais-ci-555-caseiro/>.

laranja, dourado).

5. Acessórios diversos: base de madeira, cano $\frac{3}{4}$ com 8.4 cm de altura, conector/clip de bateria 9V, fita adesiva, fio esmaltado 28 awg, fio 0,3 mm ou 0,5 mm com mais de 30cm de comprimento.

A Figura 18 ilustra fases da montagem. Os componentes e ferramentas utilizados são apresentados na Figura 18a, enquanto a Figura 18b ilustra o momento em que os alunos encontram-se soldando alguns componentes.

Figura 18 – Montagem da bobina de Tesla: (a) componentes e ferramentas utilizados; (b) soldagem de parte do circuito.



(a)



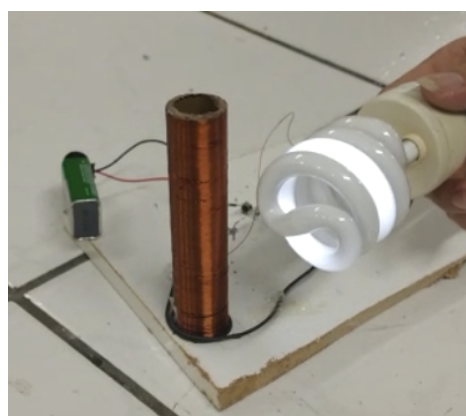
(b)

Testes com as duas bobinas construídas pelos alunos são apresentados na Figura 19.

Figura 19 – Teste das duas bobinas de Tesla construídas pelos alunos.



(a)



(b)

7.2 Montagem do detector de metais

O circuito do detector de metais é similar àquele apresentado na Figura 10, confeccionado com os seguintes componentes:

1. Bateria de 9 volts.
2. Resistor de $47\text{ k}\Omega$.
3. Dois capacitores eletrolíticos de $2,2\text{ }\mu\text{F}$.
4. Capacitor eletrolítico de $10\text{ }\mu\text{F}$.
5. Circuito integrado NE555p.
6. Autofalante pequeno.
7. Fio número 34.

A Figura 20 ilustra a montagem do detector de metais.

Figura 20 – Montagem do detector de metais: (a) componentes para o circuito; (b) montagem do detector.



(a)



(b)

Na figura 21 são apresentados dois dos detectores de metais montados pelos alunos. Um deles sendo testado com uma faca de inox.

Figura 21 – Dois detectores de metais montados pelos alunos.



(a)



(b)

Referências

ARRUDA, S. M.; TOGINHO, D. O. Laboratório caseiro: laboratório de física moderna. *Caderno Catarinense de Ensino de Física*, v. 8, n. 3, p. 232–236, 1991.

AUSUBEL, D. P. A cognitive theory of school learning. *Psychology in the Schools*, 1969.

AUSUBEL, D. P. The use of advance organizers in the learning and retention of meaningful verbal material. *Journal of Educational Psychology*, 1960.

BFO Theory. . [S.l: s.n.], 1999.

BRAGA, N. C. Localizador de metais. *Revista Saber Eletrônica*, v. setembro, p. 2–10, 1977.

BRUGNARO, L.; BARRETO, G.; MANERA, L. T. *BOBINA DE TESLA: HISTÓRIA E CONSTRUÇÃO DIDÁTICA*. . [S.l: s.n.], [S.d.]. Disponível em: <<http://teslauniverse.com>>.

BRUNS, D. G. A solid-state low-voltage Tesla coil demonstrator. *American Journal of Physics*, v. 60, n. 9, p. 797–803, 1992.

CHQUITO, A. J.; LANCIOTTI, F. Bobina de Tesla: dos circuitos ressonantes LC aos princípios das telecomunicações. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 22, n. 1, p. 69–77, 2000.

DONOSO-GARCIA, P. F.; TÔRRES, L. A. B. Ensino orientado ao projeto desafio: uma experiência para o ensino de controle, instrumentação e eletrônica. 2007, Curitiba: Cobenge 2007, 2007. p. 3B05-1-3B05-15.

GOLEMSHINSKI, G. *METAL DETECTORS AND PHYSICS EDUCATION*. *Bulgarian Academy of Sciences. Space Research and Technology Institute. Aerospace Research in Bulgaria*. [S.l: s.n.], 2015.

GONÇALVES FILHO, A.; TOSCANO, C. *Física - Interação e Tecnologia 3*. 1a. ed. São Paulo: Editioa Leya, 2013.

GOYAL, H. *Understanding of IC555 Timer and IC 555 Timer Tester*. *International Journal of Inventive Engineering and Sciences (IJIES)*. [S.l: s.n.], 2015. Disponível em: <<http://www.555-timer-circuits.com/operating-modes.html>>.

HALLIDAY, D.; RESNICK, R. *Física Básica, vol. 3*. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1981.

HALLIDAY, D.; RESNICK, R. *Fundamentos de Física, V. 4*. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1991.

JOHNSON, G. L. *BUILDING THE WORLD'S LARGEST TESLA COIL HISTORY AND THEORY*. . [S.l: s.n.], [S.d.].

KELLEY, J. B.; DUNBAR, L. The Tesla Coil. *American Journal of Physics*, 1952.

LABURÚ, C. E. A construção de uma bobina de Tesla para uso em demonstrações na sala de aula. *Caderno Catarinense de Ensino de Física de Ensino de Física*, v. 8, n. 1, p. 217–226, 1991.

MAHMOOD JAWAD, A.; MAHMOOD JAWAD, H.; CHIN HOCK, G. Design of a Beat Frequency Oscillator Metal Detector. v. 9, n. 2, p. 56–62, [S.d.]. Disponível em: <www.iosrjournals.org>.

MÁXIMO, A.; ALVARENGA, B. *Curso de Física. Vol. 3*. São Paulo: Editora Scipione, 2006.

MCNEIL, J. A. The Metal Detector and Faraday's Law. *The Physics Teacher*, v. 42, p. 8–12, 2004.

MENEZES, L. C. *et al. Coleção Quanta Física, 3o. Ano: ensino médio*. São Paulo: Editora Pueri Domus, 2010.

MILLER, J. S. Summer Session Course in Demonstration Experiments for High School Physics Teachers. *American Journal of Physics*, v. 26, p. 477–481, 1958.

MOREIRA, M. A. *A Teoria de Aprendizagem de David Ausubel como Sistema de Referência para a Organização de Conteúdo de Física**. *Revista Brasileira de Física*. [S.l: s.n.], 1979.

MOREIRA, M. A. *UNIDADES DE ENSEÑANZA POTENCIALMENTE SIGNIFICATIVAS-UEPS (Potentially Meaningful Teaching Units-PMTU). Aprendizagem Significativa em Revista/Meaningful Learning Review*. [S.l: s.n.], 2011. Disponível em: <http://moreira.if.ufrgs.br>.

SANTOS, C. A. DOS. Da micro à nanoeletrônica. *Energia e Matéria: da fundamentação conceitual às aplicações tecnológicas*. São Paulo: Livraria da Física, 2015. p. 79–108.

SANTOS, C. A. DOS. O empreendedor Edison ou o visionário Tesla? *Ciência Hoje Online*, nov. 2011.

SCHENKEL, E. A. *Relatório final: Detector de metais*. . Campinas: [s.n.], 2009.

SKELDON, K. D. *et al.* Development of a portable Tesla coil apparatus. *European Journal of Physics*, 2000.

TURNER, R. Principles of metal detection. *Electronics Today International*, v. July, p. 11–16, 1984.

TYSON, J. *How metal detectors work*.

VYGOTSKY, L. S. *A formação social da mente*. São Paulo: Livraria Martins Fontes, 1991.

WESSELS, C.; PALAG, T. *Construction of a Beat Frequency Oscillator Metal Detector*. . Boulder: [s.n.], [S.d.].