



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO  
INSTITUTO DE CIÊNCIAS EXATAS  
DEPARTAMENTO DE FÍSICA

**PROJETO, CONSTRUÇÃO E TESTE DE UM MÓDULO DEMONSTRATIVO  
PARA CENTROS E MUSEUS DE CIÊNCIAS SOBRE A GERAÇÃO DE SOM  
(MÚSICA) NO AR COMO CONSEQUÊNCIA DA RUPTURA MODULADA DA  
RIGIDEZ DIELÉTRICA DESTE MEIO.**

LUCAS GUIMARÃES PIRES DE OLIVEIRA

SEROPÉDICA  
SETEMBRO DE 2022



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO  
INSTITUTO DE CIÊNCIAS EXATAS  
DEPARTAMENTO DE FÍSICA

PROJETO, CONSTRUÇÃO E TESTE DE UM MÓDULO DEMONSTRATIVO  
PARA CENTROS E MUSEUS DE CIÊNCIAS SOBRE A GERAÇÃO DE SOM  
(MÚSICA) NO AR COMO CONSEQUÊNCIA DA RUPTURA MODULADA DA  
RIGIDEZ DIELÉTRICA DESTE MEIO

LUCAS GUIMARÃES PIRES DE OLIVEIRA

Monografia apresentada  
ao Curso de Graduação  
em Física da UFRRJ,  
como requisito parcial  
para obtenção do título de  
Licenciado em Física.

Sob Orientação do Professor

Dr. Marcelo Azevedo Neves

Seropédica

Setembro de 2022



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO  
INSTITUTO DE CIÊNCIAS EXATAS  
DEPARTAMENTO DE FÍSICA

**PROJETO, CONSTRUÇÃO E TESTE DE UM MÓDULO DEMONSTRATIVO  
PARA CENTROS E MUSEUS DE CIÊNCIAS SOBRE A GERAÇÃO DE SOM  
(MÚSICA) NO AR COMO CONSEQUÊNCIA DA RUPTURA MODULADA DA  
RIGIDEZ DIELÉTRICA DESTE MEIO**

Lucas Guimarães Pires de Oliveira

Monografia aprovada em 15 / 09 / 2022 para obtenção do título de Licenciado em Física.

Banca Examinadora:

---

Prof. Dr. Marcelo Azevedo Neves  
(Orientador)

---

Prof. Dr. Artur Jorge da Silva Lopes  
(1º Titular)

---

Prof. MSc. Francisco Antonio Lopes Laudares  
(2º Titular)

## **Agradecimentos**

Com este trabalho de conclusão de curso encerra-se um árduo e gratificante ciclo em minha vida. Parafraseando Sir Isaac Newton em sua carta para Robert Hooke: “se cheguei mais longe, foi por estar apoiado nos ombros de gigantes”.

Nada se conquista sozinho, e nessa graduação fui apoiado de todas as maneiras por pessoas, cujo trabalho e perseverança demonstraram-se essenciais para minha formação, meus professores. Em especial, agradeço meu orientador Marcelo Azevedo Neves, cujas histórias sobre suas experiências pessoais sempre nortearam minhas decisões acadêmicas, certamente um grande homem e acima de tudo, um Mestre (no mais puro sentido da palavra).

Agradeço a minha mãe Ana Paula Guimarães, que se sacrificou por anos para que eu pudesse estudar sem me preocupar com meu sustento financeiro. Diante de todas as adversidades, ela continuou lutando para que seu filho fosse o primeiro da família com o diploma de uma universidade federal. E hoje eu digo: minha conquista também é sua.

Não posso esquecer também de agradecer à minha segunda mãe: minha avó Marli Guimarães. Seus conselhos e sabedoria, de quem já passou por tudo na vida, me mantiveram sempre atento os percalços que a vida tinha a me oferecer e no final do dia, ainda me esperava em casa com seu terno sorriso e simplicidade que transmitem paz.

Agradeço a Leonardo Guimarães, meu irmãozinho. Suas contribuições vão muito além de ceder seu computador para a conclusão deste trabalho.

Você sempre me motivou a seguir pelo caminho correto, na esperança de ser um exemplo para não se desviar do próprio caminho.

Por último agradeço a Deus, pois muitas vezes nessa caminhada pensei em desistir e somente N'Ele encontrei forças pra continuar.

## **RESUMO**

Esta monografia apresenta o estudo, construção e teste de operação de um módulo demonstrativo da propagação do som (música) no ar a partir da formação de uma centelha elétrica no ar. É feita uma exposição didática e de forma integrada dos fenômenos físicos e das tecnologias envolvidas de forma encadeada para produzir o fenômeno ruptura da rigidez dielétrica do ar com subsequente geração de som (música) neste meio. O módulo demonstrativo se presta a uso mediado em Centros e Museus de Ciências para suscitar o interesse em uma sequência de processos físicos que colaboram para a ocorrência do fenômeno de emissão do som no ar mediante a ocorrência de centelhas elétricas, ou seja, relâmpagos e trovões.

## Sumário

<b>INTRODUÇÃO</b>	1
<b>1. CONTRIBUIÇÕES DE CENTROS E MUSEUS DE CIÊNCIAS AO ENSINO DA FÍSICA.</b>	4
1.1. Conceituando Centros e Museus de Ciências.	4
1.2. Contribuições de centros e museus de ciência ao ensino da Física.	7
1.3. Mediação em museus e centros de ciência usando a teoria de Vygotsky	9
<b>2. RELÂMPAGOS E TROVÕES SOB A PERSPECTIVA DA FÍSICA</b>	14
2.1. Rrigidez dielétrica	14
2.1.1. Lembrando condutores e isolantes sólidos	14
2.1.2 O que é rigidez dielétrica afinal?	16
2.2 Ruptura da rigidez dielétrica	17
2.2.1 Polarização	17
2.2.2 Ruptura dielétrica nos gases	18
2.3. Relâmpagos e trovões	23
2.3.1 Como as nuvens de tempestade se formam?	24
2.3.2. Como as cumulonimbus produzem os raios	26
2.3.3. Trovões	29
<b>3. MATERIAIS E MÉTODOS</b>	32
3.1 Proposta e esquema em blocos do equipamento desejado	32
3.2. Transformador de saída horizontal (“flyback”)	35
3.3 O circuito oscilador	38
3.3.1 Resistores	40

3.3.2. Transistores	41
3.3.3. Indutores	45
3.4. Plataforma Arduino	46
3.5. Funcionamento pretendido para o dispositivo	48
3.5.1. O oscilador Hartley	48
3.5.2. A comunicação com o Arduino	51
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÕES</b>	52
4.1. Montagem do circuito oscilador, flyback e centelhador	52
4.2. Programação do Arduino UNO	57
4.3. Teste do módulo de reprodução de músicas por centelhamentos controlados.	61
<b>5. CONCLUSÕES E PROPOSTAS</b>	64
5.1. Conclusões	64
5.2. Propostas de continuidade	64
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	65

## Índice de Figuras

<b>Figura 1:</b> Alguns tipos de estruturas de bandas.	15
<b>Figura 2:</b> Curva V x I (fora de escala) até se atingir a corrente de saturação.	19
<b>Figura 3:</b> Curva V x I (fora de escala) até se atingir a ionização negativa.	20
<b>Figura 4:</b> Curva V x I (fora de escala) até se atingir a ionização positiva e a avalanche de Townsend.	20
<b>Figura 5:</b> Modelo representativo da avalanche de Townsend.	21
<b>Figura 6:</b> Curva V x I (fora de escala) até se atingir a ionização completa.	22
<b>Figura 7:</b> Curva V x I (fora de escala) até se atingir a ruptura dielétrica.	22
<b>Figura 8:</b> Representação da evaporação da água nos oceanos.	25
<b>Figura 9:</b> Representação da formação final da nuvem.	26
<b>Figura 10:</b> Uma nuvem cumulonimbus. FONTE: (ADOBE, 2022).	26
<b>Figura 11:</b> Separação de cargas em uma nuvem.	27
<b>Figura 12:</b> Representação do deslocamento do líder escalonado	28
<b>Figura 13:</b> Representação do deslocamento das frentes de onda	30
<b>Figura 14:</b> Representação da formação do estrondo sônico	31
<b>Figura 15:</b> Circuito de uma Bobina de Tesla. Fonte: ARTHURY, 2022	33
<b>Figura 16:</b> Sequência de acionamento e controle do transformador	35
<b>Figura 17:</b> Esquema simplificado de um CRT.	36
<b>Figura 18:</b> Representação simbólica do “voo de volta” em um flyback	37
<b>Figura 19:</b> Imagem de um flyback. Fonte: (MUNDIAL COMPONENTES, 2022)	38
<b>Figura 20:</b> Circuito de controle do oscilador. No circuito, a unidade resistência é $R = 1 \Omega$ FONTE: WALLENDORF, 2014.	39
<b>Figura 21:</b> Resistores usados neste módulo do projeto.	41
<b>Figura 22:</b> Alguns tipos de estruturas de bandas diferenciando isolantes	42

condutores e semicondutores.

<b>Figura 23:</b> Analogia entre uma torneira e um transistor.	43
<b>Figura 24:</b> Representação dos transistores NPN e PNP em circuitos. FONTE: (LEARNING ABOUT ELECTRONICS, 2022)	45
<b>Figura 25:</b> Configurações dos transistores BC548B e 2N3055	45
<b>Figura 26:</b> Uma placa Arduino Uno com identificação de partes relevantes. FONTE: (SALVADOR, 2022)	47
<b>Figura 27:</b> Circuito modificado para permitir controle do centelhamento pelo Arduino UNO. No circuito, a unidade de resistência é $R = 1 \Omega$ . FONTE: WALLENDORF, 2014	49
<b>Figura 28:</b> Primeira etapa de operação. A unidade de resistência é $R = 1 \Omega$ .	50
<b>Figura 29:</b> Segunda etapa de operação. A unidade de resistência é $R = 1 \Omega$ .	50
<b>Figura 30:</b> Circuito com as conexões com a placa Arduino UNO. A unidade de resistência é $R = 1 \Omega$ .	51
<b>FIGURA 31:</b> Placa já montada e colada ao fundo de um recipiente plástico	52
<b>Figura 32:</b> Pontos de seccionamento no circuito da placa. A unidade de resistência é $R = 1 \Omega$ .	53
<b>Figura 33:</b> Pontos de derivação para conexão com o Arduino UNO.	53
<b>Figura 34:</b> Vista dos parafusos com as conexões neste módulo.	54
<b>Figura 35:</b> Enrolamentos (solenoides) nos núcleos de ferrite do flyback	54
<b>Figura 36:</b> Um dos terminais das bobinas, sendo todos também na forma de conectores garra jacaré.	55
<b>Figura 37:</b> Saídas do flyback, com o Fio de aterramento soldado ao segundo pino. (a) Vista Lateral. (b) Vista superior.	56
<b>Figura 38:</b> Montagem dos eletrodos no módulo, relativos ao flyback.	57

<b>Figura 39:</b> O sistema completo montado.	57
<b>Figura 40:</b> Carregamento de biblioteca em formato *.zip na IDE do Arduino UNO.	59
<b>Figura 41:</b> Código para a música “ <i>Imperial March</i> ” de J. Williams.	60
Figura 42: Compilação de um programa na IDE do Arduino UNO.	60
Figura 43: Carregamento de um programa na memória do Arduino UNO. (a) Selecionando o comando para carregar. (b) Mensagem que informa que o carregamento foi feito com sucesso.	61
Figura 44: Foto do sistema montado e em operação. Nota-se o centelhamento controlado pelo Arduino para reproduzir uma música claramente audível.	62
Figura 45: Detalhe mostrando o centelhamento gerado de forma controlada para reproduzir uma música claramente audível.	66

## **Índice de Quadros**

Quadro 1: Valores representativos da rigidez dielétrica de certos materiais      17

## INTRODUÇÃO

Esta monografia de conclusão de Curso de Licenciatura em Física consiste em um Projeto de Instrumentação para o Ensino voltado para uso em Centros e Museus de Ciências.

A fundamentação teórica deste Projeto é a de que o processo de alfabetização científica que ocorre através do ensino formal de ciências (pelos escolas) deve ser complementado com outras atividades em ambientes de ensino informal, e que um experimento didático serve como instrumento auxiliar do ensino, não se pretendendo, por meio dele, descobrir novas leis científicas, mas sim introduzir o aprendiz ao universo do conhecimento científico.

O problema proposto é produzir um módulo demonstrativo ("kit") que promova uma interação lúdica para Centros e Museus de Ciência, mediante a reprodução de uma música, plenamente audível, através de uma sequência de rompimentos da rigidez dielétrica do ar com a formação de centelhas.

A relevância deste estudo é a necessidade de promover uma interação lúdica em Centros e Museus de Ciências que, devidamente mediadas, suscitem o interesse em uma sequência de processos físicos que colaboram para a ocorrência do fenômeno de emissão do som no ar mediante a ocorrência de centelhas elétricas. Vale notar que a relação entre a ocorrência de relâmpagos e de trovões passa assim a ser trabalhada através de um fenômeno atrativo: a propagação de uma música gerada no ar através de centelhas elétricas geradas sob controle.

Com este trabalho espera-se avançar no conhecimento do uso integrado de diversos fenômenos físicos como motivadores do processo ensino-aprendizagem em espaços de ensino informal. Os fenômenos físicos considerados são: geração de altas tensões elétricas, modulação de sinais elétricos, ruptura dielétrica, formação de centelhas elétricas na ar, propagação do som (no caso, uma música) emitida pela formação das centelhas elétricas.

O objetivo geral é apresentar um estudo e expor didaticamente de forma integrada os fenômenos físicos e as tecnologias envolvidas de forma encadeada para produzir o fenômeno ruptura da rigidez dielétrica do ar com subsequente geração de som no ar.

Os objetivos específicos são (i) produzir um texto com uma apresentação didática da relação entre centros e museus de ciência como ensino da Física; (ii) produzir um texto com uma apresentação didática sobre a produção de centelhamentos e consequentemente som no ar, notoriamente a formação de relâmpagos e trovões; (iii) produção de um kit demonstrativo do fenômeno de propagação do som (uma música) no ar a partir da formação controlada de centelhamentos no ar, usando uma placa Arduino Uno (ARDUINO, 2022; MONK, 2013).

Para atingir estes objetivos, a pesquisa foi realizada com extensa leitura de referencial bibliográfico e execução prática da montagem e teste da operacionalidade do kit desejado. O resultado final é esta monografia de conclusão de curso, com a estrutura apresentada a seguir.

No Capítulo 1 se apresenta um texto de revisão com uma apresentação didática advindo de estudos da relação entre centros e museus de ciência como ensino da Física.

No Capítulo 2 se apresenta um texto de revisão com uma apresentação didática advinda de estudos dos processos de ruptura de rigidez dielétrica no ar, de formação de relâmpagos e de trovões, do ponto de vista da Física.

No Capítulo 3 se apresentam os materiais e métodos para atingir os objetivos pretendidos.

No Capítulo 4 são apresentados os resultados alcançados neste estudo.

No Capítulo 5 podem ser lidas as conclusões e propostas de continuidade deste estudo.

Por fim, se apresentam as referências bibliográficas usadas neste estudo.

## **1. CONTRIBUIÇÕES DE CENTROS E MUSEUS DE CIÊNCIAS AO ENSINO DA FÍSICA.**

### **1.1. Conceituando Centros e Museus de Ciências.**

Quando pensamos em museus, é comum os associar a ambientes amplos que têm por objetivo “armazenar coisas velhas”. Não obstante, esses espaços são compreendidos por grande parte da população como uma simples opção de lazer, tal qual visitar um parque ou um show de música. No entanto, além de uma opção de entretenimento, os museus também são ambientes com grande potencial de aprendizado.

Os museus e centros de ciência têm por objetivo promover a alfabetização científica, através de projetos educativos pareados com o contexto sócio cultural do local onde estão inseridos. Segundo Marandino (2001), existe uma tendência de que esses espaços atuem como complemento do ensino formal, portanto, é necessário salientarmos o que diferencia os museus das escolas.

Enquanto as escolas têm o papel de instruir e educar os indivíduos em um grande espaço de tempo, separando-os em faixas etárias, os museus precisam lidar com um público bem mais efêmero e plural, dispondo de pouco tempo para transmitir o conteúdo e por isso, baseia suas atividades em objetos pedagógicos, que em geral abordam precisamente os conceitos que o tutor deseja transmitir. A única “vantagem” da qual os museus dispõem em relação às escolas é que seu público é majoritariamente voluntário, não demandando esforço extra para atrair a atenção do mesmo.

Pela necessidade de transmitir conteúdos em relativamente pouco tempo, os processos educacionais empreendidos pelos museus e centros de ciências se baseiam principalmente na realização de experimentos. Segundo Macedo (1976):

*Experiência. Fís. Realização controlada de um fenômeno com o intuito de evidenciá-lo, de analisar as condições de sua efetivação, de medir parâmetros que lhes sejam pertinentes.*  
*Até meados do século XX, muitas experiências foram decisivas para demonstrar a veracidade de uma teoria, ou tiveram importância marcante para o desenvolvimento da Física. Receberam, por isso, a perpetuação de serem nomeadas pelos seus autores. Outras experiências pioneiras transformaram-se em métodos de medida rotineiros e difundidos, nomeados pelos seus iniciadores. (MACEDO, 1976, p. 148)*

Contudo, no contexto dos museus de ciência, os experimentos realizados possuem fins estritamente didáticos, ou seja, servem apenas para demonstrar ou exemplificar fenômenos plenamente conhecidos pela ciência, sem a pretensão de descobrir novas leis da natureza. Este tipo de abordagem com viés experimental, apesar de não produzir nada novo, torna-se importante por aproximar os alunos da prática científica real, por auxiliá-los na construção do

raciocínio lógico e estimular a criatividade por “forçá-los” a buscar respostas para o fenômeno demonstrado.

Ao tentar formular hipóteses sobre o fenômeno, o aluno busca explicações razoáveis em seu arcabouço mental, baseando-se em suas experiências pregressas, sendo naturalmente inserido no processo de aprendizagem significativa, conforme proposto por Ausubel (1963) e descrito por Moreira (2010):

*“É importante reiterar que a aprendizagem significativa se caracteriza pela interação entre conhecimentos prévios e conhecimentos novos, e que essa interação é não literal e não arbitrária. Nesse processo, os novos conhecimentos adquirem significado para o sujeito e os conhecimentos prévios adquirem novos significados ou maior estabilidade cognitiva.”* (MOREIRA, 2010, p. 2)

Segundo esta abordagem, existe aprendizagem significativa quando o aluno associa conhecimentos antigos com novas informações. Portanto é importante que os experimentos realizados sejam hábeis em deslocá-lo de sua zona de conforto.

Desta forma, pela Teoria da Aprendizagem Significativa, Centros e Museus de Ciência podem contribuir de forma positiva para o processo ensino-aprendizagem da Física se o visitante/aprendiz se defronta com um módulo

experimental (“kit”) que exerce esta função de associa conhecimentos antigos com novas informações.

Isto quer dizer que, conforme proposto por (Ausubel, 1963) e descrito por (Moreira, 2010), durante o desenvolvimento de um módulo experimental (em especial para uso em Centros e Museus de Ciência) deve-se procurar um meio termo entre o familiar e o contra intuitivo, e dessa maneira pode-se garantir o aprendizado sem correr o risco de perder o interesse do aluno, em meio aos novos conceitos apresentados.

## **1.2. Contribuições de centros e museus de ciência ao ensino da Física.**

Apesar de ser quase inteiramente descrita através da linguagem matemática, a Física é uma ciência natural e fundamentalmente fenomenológica, isto é, sua principal atribuição é explicar a natureza através do que é observado.

Diante deste viés inherentemente experimental, não é razoável que o ensino de física se baste apenas com a teoria, uma vez que apenas resultados matemáticos não significam muita coisa se o aluno não souber interpretar os dados e os analisar: se fazem sentido no contexto do fenômeno estudado.

Em suma, a Física é sustentada por dois grandes “pilares”, a teoria matemática e a prática experimental. No entanto, enquanto a teoria pode ser inteiramente ministrada em aulas expositivas dentro de uma sala de aula. A parte prática demanda uma estrutura um pouco mais complexa e até mais cara. Pensando nisso, museus e centros de ciência tomam como uma de suas atribuições o apoio ao ensino escolar, oferecendo em suas instalações a estrutura com a qual muitos colégios não conseguem arcar financeiramente:

*“(...) hoje, no início do século XXI, mais de cem anos de história se passaram desde a introdução da Física nas escolas no Brasil, mas sua abordagem continua fortemente identificada com aquela praticada há cem anos atrás: ensino voltado para a transmissão de informações através de aulas expositivas utilizando metodologia voltadas para a resolução de exercícios algébricos.” (ROSA et al, 2005)*

Hoje em dia, com a tecnologia presente em todos os aspectos da nossa vida, o ensino expositivo de física tornou-se historicamente defasado, uma vez que a ementa adotada pela maioria das escolas se limita ao que era estudado pelos cientistas no século retrasado. Apesar do ensino de física moderna estar previsto em lei, poucos professores a lecionam, seja por falta de domínio do conteúdo, por falta de tempo, ou por que este tema corresponde a apenas 1,7% das questões de física presentes no Exame Nacional do Ensino Médio (ENEM):

*“O ensino de física no nível médio não tem acompanhado os avanços tecnológicos ocorridos nas duas últimas décadas e tem se mostrado cada vez mais distante da realidade dos alunos. O currículo obsoleto, desatualizado e descontextualizado representa um problema tanto para os professores quanto para os*

*estudantes e torna a prática pedagógica, que normalmente se resume ao quadro de giz, monótona e desinteressante para os atores envolvidos nesse processo.” (OLIVEIRA, VIANNA, GERBASSI 2007).*

Dito isto, a prática experimental assume também a função de aproximar o conteúdo disciplinar da vivência cotidiana do aluno, simplificando conceitos e isolando fenômenos para explicá-los com um suporte tátil e/ou visual que na maioria das vezes abandona a necessidade de abstração.

Portanto, os museus e centros de ciência contribuem com o ensino de física por fornecer a estrutura e o suporte para desenvolver a prática experimental fora do ensino superior, aproximando os estudantes do fazer científico, mostrando como funcionam os métodos e processos que transformam simples hipóteses em teorias bem estruturadas.

### **1.3. Mediação em museus e centros de ciência usando a teoria de Vygotsky.**

Além de fornecer o aporte visual para o ensino, os objetos pedagógicos presentes nos centros e museus de ciências podem atuar de outras maneiras no processo de aprendizagem. Segundo Gaspar (1993), esses objetos também promovem interações entre os alunos, o que por sua vez, os ajuda a chegar a novas conclusões e transpor seu atual nível de conhecimento.

Um ambiente que estimula o aparecimento de interações sociais é um ambiente onde o processo ensino-aprendizagem pode, efetivamente, se

desenvolver, e um museu ou centro de ciências pode ser esse ambiente (GASPAR, 1993, p. 72).

Normalmente, o tipo de interação social que surge organicamente nos museus e centros de ciência não pode ocorrer dentro de uma sala de aula, já que o paradigma escolar é baseado na exposição dos conteúdos e centralização da propriedade do conhecimento na figura do professor.

Para Lev Vygotsky (1896-1934), em sua pedagogia sociocultural (GASPAR, 2014; MOREIRA, 1999), todas as pessoas tem a capacidade de aprender novos conceitos, respeitada a capacidade mental do aluno, expressa por Vygotsky como sendo sua ***zona de desenvolvimento imediato*** (GASPAR, 2014; MOREIRA, 1999).

Como cada aprendiz apresenta diferentes estruturas mentais e lacunas construtivas diferentes, Vygotsky propôs que é necessário que haja uma interação social, onde alguém com capacidade de guiar a construção do conhecimento direciona as interações entre os aprendizes e os alunos possam interagir entre si. Desta forma, as estruturas mentais próprias de cada aprendiz naquele momento podem ser compartilhadas, fazendo então com que a interação social seja também um processo necessário para a uma construção mais ampla e completa de nossas estruturas mentais de um dado conceito físico. Por esta proposta, quando interagimos socialmente conseguimos construir estruturas mentais com mais facilidade para o aprendizado de novos conceitos. Segundo Vygotsky, todos somos capazes de aprender novos

conceitos, sem a necessidade de uma construção prévia de uma estrutura mental para suportar tal conceito.

Para Marandino (2001), as interações mediadas pelos objetos pedagógicos podem ser explicadas pela teoria da aprendizagem de Vygotsky, pois ao exigir que o aluno elabore hipóteses para explicar um fenômeno, o experimento didático atua na Zona de Desenvolvimento Proximal.

*“O conceito de zona de desenvolvimento proximal fornece elementos para essa reflexão. Para este autor, tal conceito corresponde à distância entre o nível de desenvolvimento real, que se costuma determinar através da solução independente de problemas, e o nível de desenvolvimento potencial, determinado através da solução de problemas sob orientação de um adulto ou em colaboração com companheiros mais capazes”.*

(MARANDINO, 2001, p. 10).

A elaboração de um objeto pedagógico sob perspectiva vygotskiana, deve sempre considerar o nível de conhecimento do aluno, isto é, se a ideia é atuar sobre a **zona de desenvolvimento imediato**, o experimento deve conter conceitos plenamente dominados pelo educando ao mesmo tempo em que lhe

introduz novos conteúdos, dessa forma ele é desafiado a fazer conexões e estruturar um pensamento científico.

Desta forma, pela Teoria de Vygotsky, em Centros e Museus de Ciência os aprendizes, com a ação de um mediador do centro ou museu de ciências, podem estabelecer uma interação social para uma construção mais ampla e completa de suas estruturas mentais de um dado conceito físico.

De 2009 a 2013, o número de Centros e Museus de Ciências no Brasil subiu de 190 para 268 (41%), e a listagem com detalhes destas instituições podem ser lidas na terceira edição do "Guia de Centros e Museus de Ciência do Brasil", uma publicação de livre acesso disponível para download gratuito (ABCMC, 2015).

De forma a divulgar os diversos Centros e Museus de Ciência disponíveis pra visitação na América Latina e no Caribe, a Rede de Popularização da Ciência e da Tecnologia na América Latina e no Caribe (RedPOP), juntamente com o Museu da Vida (COC/Fiocruz) e o Escritório Regional de Ciência da Unesco, lançaram o primeiro Guia de Centros e Museus de Ciência da América Latina e do Caribe. A publicação é de livre acesso, traz uma relação de aproximadamente 470 centros da região, e está disponível para download gratuito (MASSARANI, 2015).

Uma base longitudinal com dados da circunstância da visita, opinião sobre o museu, hábitos culturais e perfil sociodemográfico e econômico do público de visitação espontânea de cinco museus de ciência e tecnologia

situados na cidade do Rio de Janeiro, que estão acima dos objetivos deste trabalho, encontram-se disponíveis em (MANO, 2017).

Concluímos assim que Centros e Museus de Ciência tem função positiva e relevante para o ensino-aprendizagem da Física.

## 2. RELÂMPAGOS E TROVÕES SOB A PERSPECTIVA DA FÍSICA

### 2.1. Rigidez dielétrica

#### 2.1.1. Lembrando condutores e isolantes sólidos

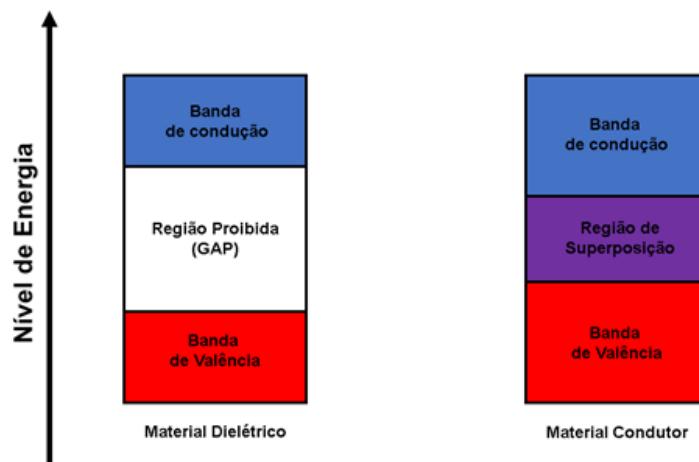
Desde a nossa infância aprendemos que não devemos colocar a mão em um fio desencapado ou na ponta do plugue de uma tomada. Basicamente, o que fazemos nessa situação é evitar entrar em contato com a parte metálica do fio para não receber um choque elétrico. A capa plástica ou emborrachada que protege o metal é capaz de evitar que a energia seja transmitida para o nosso corpo, portanto é normal nos perguntarmos o que diferencia um material do outro quanto a seu comportamento elétrico.

Materiais eficientes em transmitir eletricidade são chamados de condutores e essa capacidade se deve a sua baixa resistividade, também conhecida como resistência específica. A resistividade, que podemos denotar pela letra grega  $\rho$ , de forma superficial, quantifica a dificuldade de transmissão de uma corrente elétrica por determinado material.

Classicamente, a resistividade pode ser explicada através do **Modelo de Drude**, que define o conceito de caminho livre médio como o espaço em que os elétrons podem se deslocar sem colidir com os átomos que compõem a estrutura cristalina do material (TIPLER, 2001). Ou seja, quanto maior o caminho livre médio entre colisões, menos obstáculos impedem o elétron de se deslocar e menor é a resistividade.

Com o advento da mecânica quântica e desenvolvimento da física do estado sólido, hoje em dia entendemos a condução elétrica através da **Teoria de Bandas**, que estabelece que as energias dos elétrons em um cristal se encontram em níveis de energia dentro de certas faixas (“bandas”) com limites bem definidos, e que advém da estrutura cristalina em que se encontram (TIPLER, 2001). Para que um material seja considerado condutor é necessário que: ou não exista uma banda proibida (“gap”) entre as bandas de valência e de condução (as bandas se interpenetram); ou que os elétrons ocupem apenas parcialmente uma banda, ou seja, os níveis de energia mais altos disponíveis estão bem abaixo da energia do topo da banda (TIPLER, 2001). Deste modo, alguns elétrons da camada de valência ficam tão fracamente ligados a seus respectivos átomos que são capazes de se deslocar livremente.

**Figura 1:** Alguns tipos de estruturas de bandas



Na Figura 1 se ilustra, à direita, o caso particular de um material condutor no qual existe uma região de superposição das bandas de valência e condução. Ainda na Figura 1, à esquerda, se ilustram bandas de energia de um dielétrico genérico, onde existe uma grande barreira energética a ser superada para que os elétrons de valência possam conduzir.

É importante salientar que tanto o Modelo de Drude quanto a Teoria de Bandas descrevem apenas o comportamento elétrico de **sólidos** e para os fins do presente trabalho servem apenas para ilustrar as diferenças entre condutores e isolantes.

### 2.1.2 O que é rigidez dielétrica afinal?

Na nossa vivência cotidiana, institutivamente usamos a rigidez dielétrica a nosso favor. O ar atmosférico, via de regra, é um bom dielétrico e por isso não nos preocupamos ao passar desprotegidos ao lado de uma tomada. Da mesma forma, usinas elétricas que lidam com altíssimas tensões isolam seus cabos com grossas camadas de borracha ou gases pouco reagentes como o hexafluoreto de enxofre.

Chamamos de rigidez dielétrica a diferença de potencial elétrico máxima suportada por um material isolante antes que ele passe a conduzir.

No caso de um material sólido dielétrico, pela teoria de bandas de energia (TIPLER, 2001), a rigidez dielétrica seria o equivalente macroscópico ao tamanho do gap entre as bandas de valência e condução. Além disso, havemos de considerar também a extensão espacial do dielétrico, uma vez que, segundo o Modelo de Drude (TIPLER, 2001), quanto maior o “caminho” a

ser percorrido pelo elétron, mais obstáculos ele terá que transpor e maior a sua resistividade. Portanto, a unidade da rigidez dielétrica no Sistema Internacional é o volt por metro (V/m). No Quadro 1, encontram-se alguns exemplos de valores de rigidez dielétrica de alguns materiais.

Quadro 1: Valores representativos da rigidez dielétrica de certos materiais

<b>Material</b>	<b>Rigidez dielétrica (V/m)</b>
Ar	$3 \cdot 10^6$
Papel	$16 \cdot 10^6$
Teflon	$60 \cdot 10^6$
Borracha	$12 \cdot 10^6$
Porcelana	$12 \cdot 10^6$
Madeira	$\sim 10 \cdot 10^6$
Óleo (transformador)	$20 - 30 \cdot 10^6$

Fonte: MUNDO EDUCAÇÃO, 2022.

## 2.2 Ruptura da rigidez dielétrica

### 2.2.1 Polarização

Como visto anteriormente, materiais dielétricos se comportam como isolantes até o limite de sua rigidez. Para entendermos como é possível que haja condução a partir desse limite, precisamos primeiramente compreender um fenômeno característico dos dielétricos: a polarização.

*“Quando um material dielétrico é colocado em um campo elétrico, as cargas elétricas não fluem através do material como em um condutor elétrico, mas apenas se deslocam ligeiramente de suas posições médias de equilíbrio, causando polarização dielétrica. Devido à polarização dielétrica, as cargas positivas são deslocadas na direção do campo e as cargas negativas mudam na direção oposta ao campo. Isso cria um campo elétrico interno que reduz o campo geral dentro do próprio dielétrico”.* (USP, 2020a).

Na presença de campos elétricos externos com intensidade superior à polarização do dielétrico, este passará a conduzir e ocorrerá o que chamamos de “ruptura da rigidez dielétrica”.

A explicação do fenômeno de ruptura da rigidez dielétrica depende do estado físico do material. Nos atentaremos apenas aos dielétricos gasosos, os quais possuem uma estrutura atômica molecular mais simples que os demais.

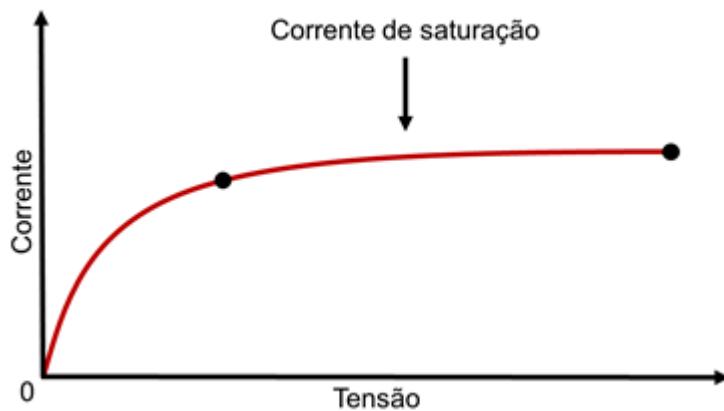
### **2.2.2 Ruptura dielétrica nos gases**

Para entender como ocorre a ruptura dielétrica em meios gasosos, consideremos um sistema composto por dois eletrodos separados por um gás, nos quais aplicaremos uma diferença de potencial crescente.

Em um primeiro momento os elétrons dos átomos serão atraídos pra o eletrodo positivo e seus núcleos para o eletrodo negativo. Desta forma, a corrente elétrica também aumentará até um ponto em que se estabilizará,

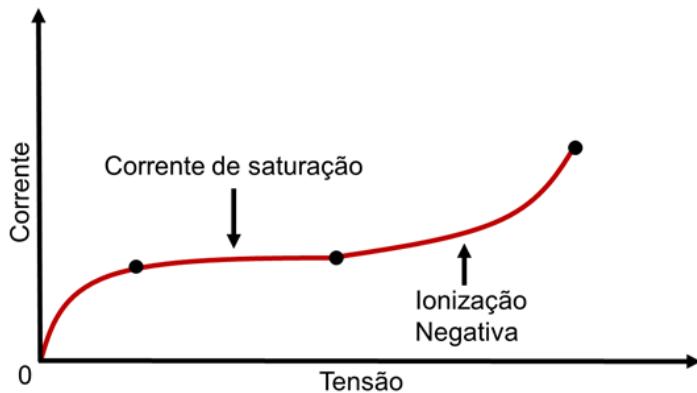
mesmo com o aumento da tensão. A este ponto de estabilidade damos o nome de “corrente de saturação” (PEREIRA, 2022), apresentada graficamente na Figura 2.,

**Figura 2:** Curva V x I (fora de escala) até se atingir a corrente de saturação.



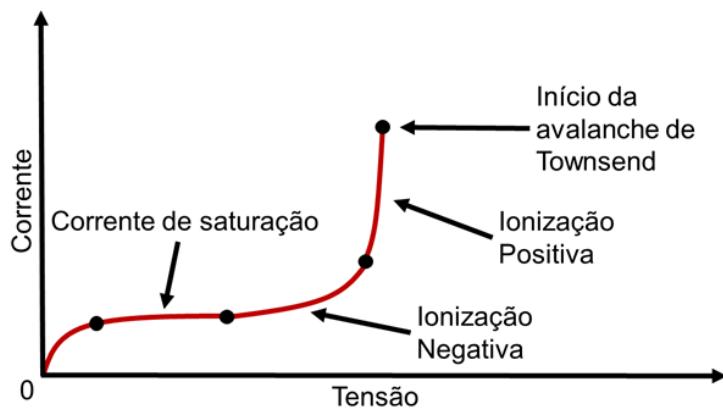
Se insistirmos em aumentar a tensão além do ponto de saturação, os elétrons inicialmente separados de seus núcleos pela ação do campo, aumentarão sua velocidade e eventualmente colidirão com átomos neutros arrancando seus elétrons em uma reação em cadeia acumulativa, que chamamos de ionização negativa. Este processo está representado na Figura 3.

**Figura 3:** Curva V x I (fora de escala) até se atingir a ionização negativa.



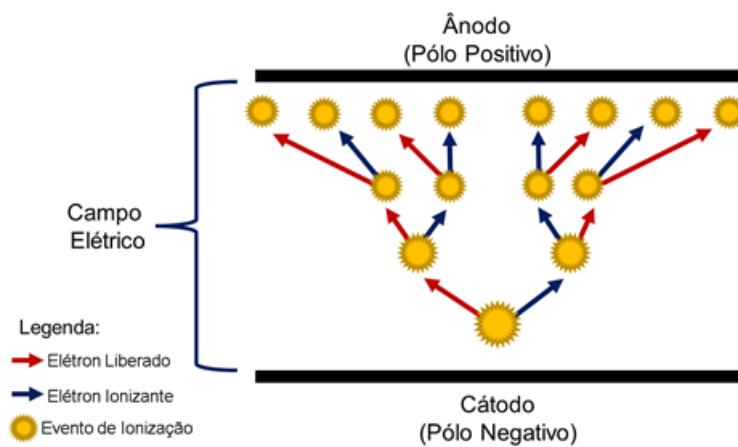
A partir da região de ionização negativa, o aumento progressivo de tensão concede aos íons positivos energia suficiente para separar os elétrons outros átomos. Desta forma a ionização aumenta ainda mais, uma vez que agora, cada átomo ionizado gera mais dois em um crescimento exponencial conhecido como “avalanche de elétrons” ou “**avalanche de Townsend**” (USP, 2020b).

**Figura 4:** Curva V x I (fora de escala) até se atingir a ionização positiva e a avalanche de Townsend.



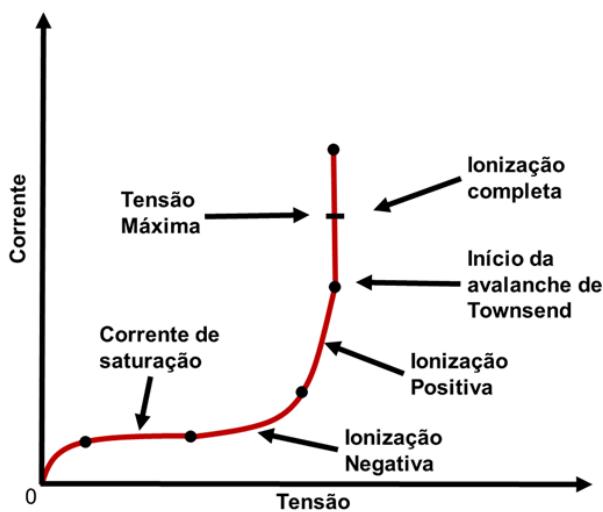
A figura 5 ilustra a reação em cadeia da Avalanche de Townsend da perspectiva dos elétrons liberados sem considerar a contribuição dos íons positivos que se deslocam no sentido oposto.

**Figura 5:** Modelo representativo da avalanche de Townsend



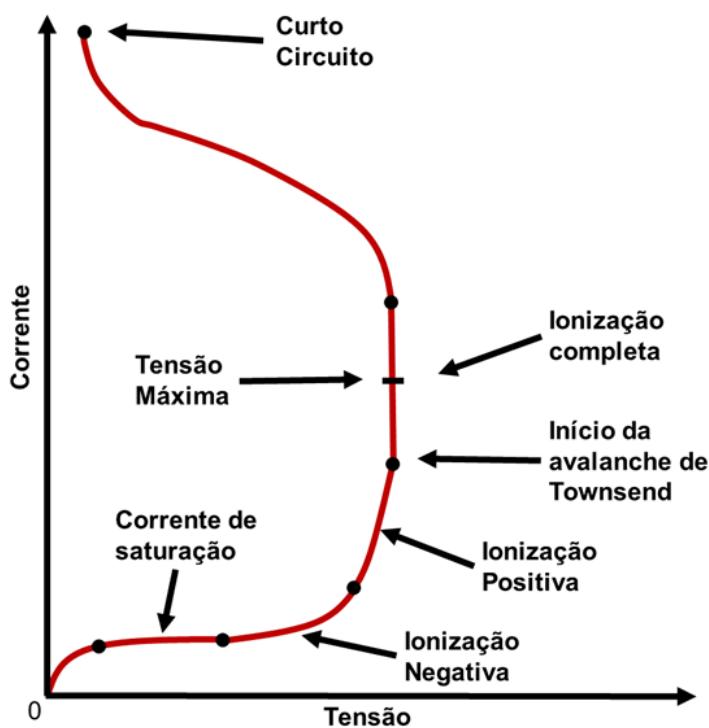
A partir do início da avalanche, a tensão atinge seu valor máximo na região que chamamos de ionização completa, representada graficamente na Figura 6.

**Figura 6:** Curva V x I (fora de escala) até se atingir a ionização completa.



Depois da etapa de ionização completa, a corrente continua aumentando muito rápido, mesmo que a tensão seja diminuída, causando instabilidade e gerando a ruptura. Nesse estado, o sistema entra em curto circuito e a tensão cai abruptamente (PEREIRA, 2022).

**Figura 7:** Curva V x I (fora de escala) até se atingir a ruptura dielétrica.



Vale informar que os gráficos V x I acima são meramente ilustrativos e servem apenas para demonstrar as etapas do processo de ionização sem respeitar o compromisso com dados experimentais reais (estão fora de escala).

Parâmetros como a tensão máxima, por exemplo, dependem diretamente da pressão do gás em questão e da distância dos eletrodos. A relação entre pressão, espaçamento e tensão é dada pela relação numérica deduzida empiricamente pela primeira vez por Friedrich Paschen em 1889. A Lei de Paschen fornece a tensão de ruptura ( $V_B$ ) em Volts e é dada pela relação [1].

$$V_B = \frac{B \times p \times d}{\ln(A \times p \times d) - \ln \left[ \ln \left( 1 + \frac{1}{\gamma_{se}} \right) \right]} \quad [1]$$

Na relação [1], o parâmetro  $B$  está relacionado às energias de excitação e ionização, sendo que  $p$  é a pressão em pascal,  $d$  é a distância dos eletrodos em metros,  $\gamma_{se}$  é o coeficiente de emissão de elétrons secundários (elétrons emitidos por íon positivo incidente), e  $A$  é a ionização por saturação no gás em um determinado campo elétrico.

### **2.3. Relâmpagos e trovões**

O Brasil é o maior país tropical do mundo. Esta alcunha, apesar de trazer inúmeros benefícios para seus residentes, também confere ao nosso país o título de campeão em incidência de raios, superando a média de 70 milhões de descargas elétricas anualmente, segundo o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) (FIORATTI, 2021).

Sendo um fenômeno físico tão chamativo e algo tão comum em nossa experiência cotidiana, as descargas elétricas atmosféricas proporcionam verdadeiros laboratórios naturais de ensino de física. As características próprias deste fenômeno permitem estudos em diversas áreas, tais como o eletromagnetismo e acústica ao provocar indagações sobre a origem da energia elétrica, da luz e do som emitidos.

Os raios nada mais são do que o fenômeno da ruptura da rigidez dielétrica do ar que ocorre naturalmente na atmosfera. Como já apresentado anteriormente, para que isso aconteça é necessário que haja uma grande diferença de potencial elétrico entre dois eletrodos carregados, por isso, é válido nos perguntarmos: de onde vem toda essa energia?

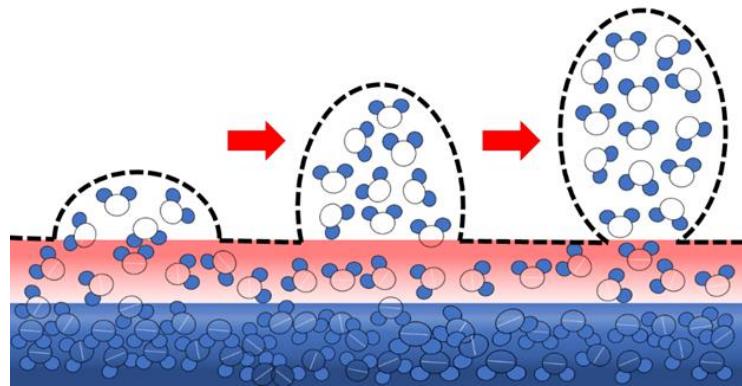
### 2.3.1 Como as nuvens de tempestade se formam?

A fim de compreender a formação dos raios, é preciso entender primeiramente o sistema meteorológico onde se originam. As nuvens são grandes massas de água líquida suspensas na atmosfera com a capacidade de armazenar quantidades inimagináveis de energia. O surgimento de uma **cumulonimbus**, como são chamadas as grandes nuvens de tempestade, acontece de forma gradual pela ação do sol no planeta (REICH, 2015)

A luz solar que incide na Terra (sobretudo nos oceanos), aliada aos ventos, quebra as ligações entre as moléculas da superfície da água no fenômeno que chamamos de evaporação. Por conta da convecção do ar mais frio ao redor das moléculas que se desprenderam, formam-se pequenos aglomerados de vapor de água ascendentes. Por serem menos densas que as

moléculas mais abundantes na atmosfera (Nitrogênio e Oxigênio) as moléculas de água tornam o ar mais leve, o que favorece ainda mais a subida desses aglomerados. Este processo é ilustrado na figura 8.

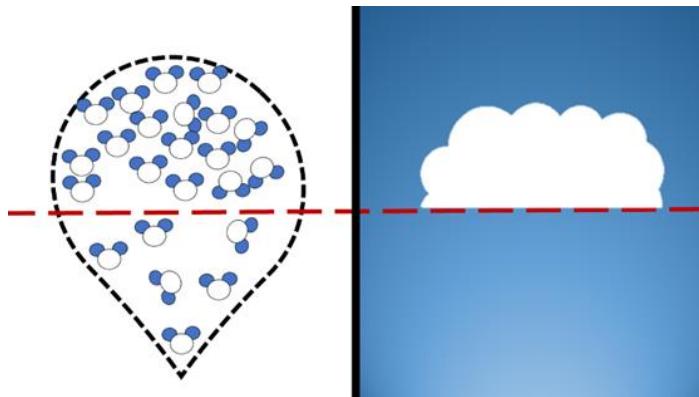
**Figura 8:** Representação da evaporação da água nos oceanos.



Na Figura 8, a região em vermelho representa a camada de moléculas separadas da superfície e a região em azul representa o corpo d'água em si, onde as moléculas ainda não aqueceram com a luz do sol (REICH, 2015).

À medida que sobe, a bolha de vapor se expande por conta da diminuição da pressão atmosférica, desta forma começa a reduzir seu calor interno e consequentemente sua temperatura até chegar a um limite em que o próprio vapor se condensa em minúsculas gotículas de água, a começar pelo topo. A nuvem que se forma apresenta a característica base achataada das cumulonimbus (REICH, 2015). A Figura 9 ilustra este processo.

**Figura 9:** Representação da formação final da nuvem



Na Figura 9, a linha tracejada vermelha é o limite de condensação, a partir do qual a bolha de vapor começa a formar a nuvem, sendo que as cumulonimbus são facilmente identificáveis por possuírem formato de bigorna (REICH, 2015), como a vista na Figura 10.

**Figura 10:** Uma nuvem cumulonimbus. FONTE: (ADOBE, 2022).



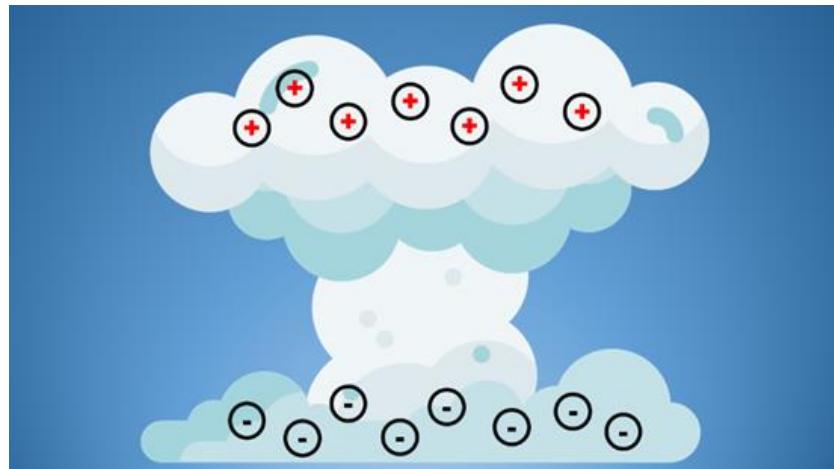
### 2.3.2. Como as cumulonimbus produzem os raios

Como vimos, as cumulonimbus são formadas pelo vapor de água ascendente que se condensa ao atingir determinada altura. A partir desse ponto, as gotículas de água que formam a nuvem continuam subindo à medida que mais vapor se condensa.

Eventualmente, as gotículas que subiram o suficiente congelam devido à baixa temperatura do ar ao seu redor, formando pequenos cristais de gelo. Esses cristais continuam crescendo até o ponto que se tornam pedras de granizo e as correntes de ar ascendentes não conseguem mais sustentá-los (PRASS, 2022).

Ao cair, o granizo colide inúmeras vezes com os cristais de gelo que sobem, arrancando alguns de seus elétrons. Desta forma, a nuvem como um todo tem suas cargas separadas gradativamente até que sua base fique carregada negativamente e seu topo positivamente (PRASS, 2022). A Figura 11 ilustra esta situação.

**Figura 11:** Separação de cargas em uma nuvem.

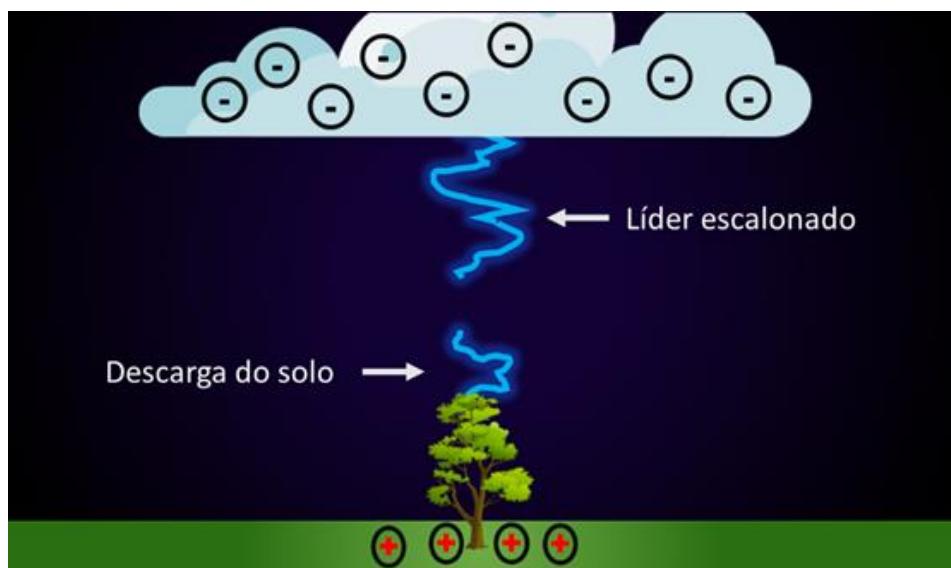


Naturalmente, a separação de cargas produz um campo elétrico que aumenta em intensidade no interior da nuvem. Quando a diferença de potencial elétrico se torna demasiadamente grande (na ordem de milhões de volts), ocorre a ruptura dielétrica para neutralizar as cargas (PRASS, 2022).

A base da nuvem, negativamente carregada, também dá origem a um fenômeno chamado de “quebra de rigidez preliminar” (PRASS, 2022), onde pequenas descargas elétricas não visíveis, chamadas de **líderes** são criadas. Quando um desses líderes escapa da nuvem em direção ao solo, recebe o nome de **líder escalonado** (PRASS, 2022).

Ao se deslocar em direção ao solo numa velocidade aproximada de 400.000 km/h, o líder escalonado, formado de cargas negativas, induz o acúmulo de cargas positivas em objetos pontiagudos como os galhos de uma árvore. Essas cargas positivas também produzem descargas luminosas que caminham em direção ao líder e quando eles se encontram, a nuvem fica imediatamente aterrada ao solo (PRASS, 2022). A Figura 12 ilustra este fenômeno.

**Figura 12:** Representação do deslocamento do líder escalonado



Na sessão 2.2, vimos que no processo de ruptura dielétrica um gás se ioniza tornando-se plasma. Nesse estado, a colisão dos elétrons livres com os

núcleos de outros átomos produz luz visível de alta frequência, próxima ao violeta, o que chamamos de **Efeito Corona** (HELERBROCK, 2022a).

E este é o processo de formação dos relâmpagos.

### 2.3.3. Trovões

Além do espetáculo luminoso, os relâmpagos (“raios”) são conhecidos por emitirem fortes sons, os quais chamamos de **trovões**.

Para entender como o som é formado em uma descarga elétrica atmosférica, devemos nos aprofundar em um efeito físico que está intimamente ligado à sua natureza ondulatória: o efeito Doppler (HELERBROCK, 2022c)

Quando uma fonte sonora move-se em relação a um observador, a frequência percebida varia em função de suas velocidades conforme a relação [2] (HELERBROCK, 2022c).

$$f_0 = f_f \times \frac{v \pm v_0}{v \mp v_f} \quad [2]$$

Na relação [2], as grandezas envolvidas são:

- $f_0$  = é a frequência percebida
- $f_f$  = é a frequência emitida (frequência real)
- $v$  = é a velocidade do som no meio
- $v_0$  = é a velocidade do observador em relação ao meio (positiva ao se aproximar da fonte, negativa ao se afastar)

- $v_f$  = é a velocidade da fonte em relação ao meio (positiva ao se afastar, negativa ao se aproximar do observador)

Como o som é uma onda mecânica que surge de pequenas diferenças de pressão, sua velocidade é definida apenas pelas condições do meio no qual se propaga, sendo finita.

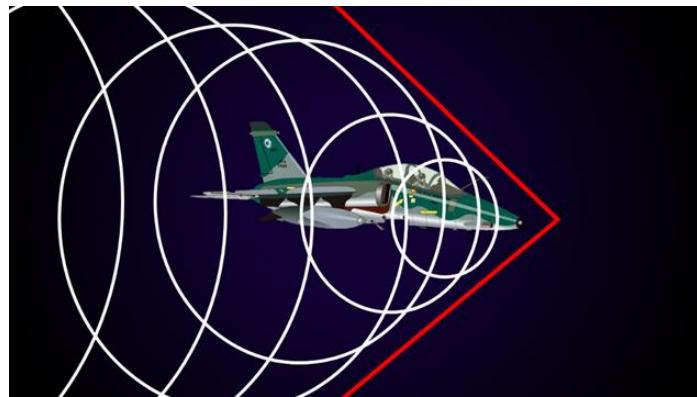
A movimentação do objeto emissor provoca uma sutil mudança nas frentes de onda, comprimindo-as no sentido do movimento. Perceba que, conforme representação da Figura 13, as frentes de onda (linhas brancas) estão menos esparsas na frente do objeto, como consequência a frequência audível percebida nessa região será maior que a frequência real.

**Figura 13:** Representação do deslocamento das frentes de onda



Para objetos que se movem a velocidades superiores à de propagação do som no meio em que se encontra, as frentes de onda são comprimidas ao ponto de gerarem uma região de altíssima pressão, a qual se expande rapidamente, gerando um ruído intenso que chamamos de “estrondo sônico” (HANGAR33, 2015).

**Figura 14:** Representação da formação do estrondo sônico



Na Figura 14, observamos um “acúmulo” de frentes de onda na região delimitada pela linha vermelha. O fenômeno ilustrado é comumente conhecido como “quebra da barreira do som” (HANGAR33, 2015).

Durante a quebra da rigidez dielétrica, especialmente durante a avalanche de Townsend (descrita na seção **2.2**), o ar ionizado aquece-se de maneira abrupta, podendo ultrapassar os 27.000 °C (PRASS, 2022). Se considerarmos que a atmosfera comporta-se aproximadamente como um gás ideal, este aumento de temperatura acarreta no aumento da pressão naquela região, ocorrendo, desta forma a compressão das frentes de onda de forma análoga à descrita anteriormente. Quando a descarga acontece efetivamente, ouve-se um som agudo parecido com um forte estalo seguido de um som mais grave que pode reverberar por quilômetros (PRASS, 2022).

E assim se forma um **trovão**.

Desta forma, com este texto se apresentou de forma didática o processo físico de formação de relâmpagos e trovões.

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 Proposta e esquema em blocos do equipamento desejado

A grande quantidade de conteúdos que podem ser abordados através do estudo das descargas elétricas atmosféricas torna desejável que este fenômeno seja facilmente reproduzido em ambiente controlado.

Isto, aliado ao fato de que grandes tempestades de raios não são comuns em algumas épocas do ano, cria a necessidade da construção de um aparato experimental que reproduza as características mais importantes do fenômeno natural de maneira simples e relativamente segura.

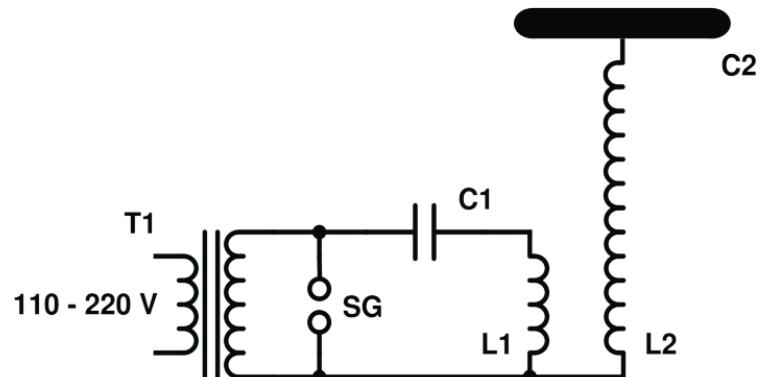
Tendo em vista esse objetivo, o presente trabalho volta o olhar para os Séculos XIX e XX, buscando inspiração em dos mais famosos aparelhos experimentais criado pelo engenheiro croata Nikola Tesla (1856 -1943), a máquina geradora de raios que é conhecida até hoje pelo nome de **Bobina de Tesla** (FRAZÃO, 2020).

Em 1820, o físico e químico dinamarquês H.C. Oersted (1777-1851) demonstrou em seu mais famoso experimento que uma corrente elétrica que atravessa um condutor produz um campo magnético em torno do mesmo (JUNIOR, 2022). Onze anos depois, o também físico e químico inglês Michael Faraday (1791-1867), ao repetir os passos de Oersted, observou que a variação do campo magnético produzido é capaz de induzir o surgimento de uma corrente elétrica em outro condutor independente. O fenômeno descoberto por Faraday em 1831, conhecido como lei da indução eletromagnética, é o

princípio de funcionamento dos motores elétricos, geradores e transformadores (HELERBROCK, 2022b).

A Bobina de Tesla é um transformador cuja função principal é aumentar em sua saída a tensão de entrada, para forçar a ruptura da rigidez dielétrica. Usualmente, ela é composta por um banco de capacitores, um centelhador e duas bobinas com diferentes números de espiras (HELERBROCK, 2022b). A Figura 15 apresenta um esquema deste circuito (ARTHURY, 2022).

**Figura 15:** Circuito de uma Bobina de Tesla. Fonte: ARTHURY, 2022.



A tensão da rede alimenta um primeiro transformador (T1) que tem a função de converter os 127/220 V CA da rede em cerca de 5KV CC. Em seguida o centelhador (SG) descarrega continuamente o banco de capacitores (C1) sobre a bobina primária (L1), que por sua vez gera um campo magnético intermitente capaz de induzir o surgimento de uma corrente da bobina secundária (L2). Como L2 possui cerca de 1000 vezes o número de espiras de L1, a tensão é aumentada segundo a equação dos transformadores, que é dada (idealmente) pela relação [3] (HELERBROCK, 2022b).

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad [3]$$

Na relação [3],  $V_1$  é a tensão de entrada,  $V_2$  é a tensão de saída,  $N_1$  é o número de espiras da bobina primária e  $N_2$  é o número de espiras da bobina secundária.

Por conta da conservação de energia, é esperado que o aumento de tensão acarretasse na diminuição da corrente, portanto a mesma equação pode ser escrita (idealmente) pela relação [4] (HELERBROCK, 2022b).

$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{N_1}{N_2} \quad [4]$$

Na relação [4], temos que  $I_1$  é a corrente de entrada e  $I_2$  é a corrente de saída.

Embora este modelo da Bobina de Tesla seja eficiente em gerar descargas elétricas no ar, seu projeto original não foi concebido para o contexto educacional.

Algumas características do projeto, sobretudo o seu tamanho, o tornam muito perigoso para o contato com o público mais jovem. Por isso, este trabalho dedica-se a demonstrar as etapas de desenvolvimento e construção de uma versão mais simples, barata, segura e lúdica do projeto criado por Tesla.

O objeto pedagógico que será descrito a seguir trata-se de um circuito eletrônico cujo projeto já é bastante difundido na internet. Esse dispositivo é uma adaptação da Bobina de Tesla, criada especificamente para ser acessível, uma vez que os materiais utilizados são de baixo custo ou reaproveitados.

Como o objetivo final é reproduzir músicas através de centelhas elétricas, modulando suas frequências com o auxílio de uma placa Arduino Uno (ARDUINO, 2022; MONK, 2013), então além da plataforma de programação é necessário um transformador capaz de gerar ruptura dielétrica e um circuito oscilador de corrente capaz de fazer a conexão entre os demais módulos, conforme a Figura 16 representa.

**Figura 16:** Sequência de acionamento e controle do transformador



A fim de facilitar o entendimento, nas seções seguintes descreveremos cada módulo separadamente e posteriormente suas funções no dispositivo, bem como seu funcionamento.

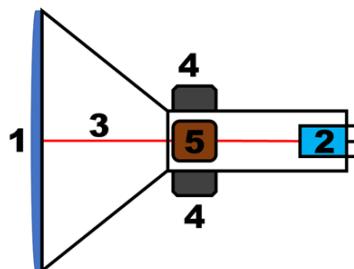
### 3.2. Transformador de saída horizontal (“flyback”)

O primeiro módulo do qual vamos tratar resume-se a apenas um componente. Para gerar a alta tensão necessária para produzir a ruptura dielétrica, é necessário um transformador elevador de tensão que forneça uma saída na ordem de 10KV. A opção mais economicamente viável encontrada para o projeto foi a utilização de um **transformador de saída horizontal**, conhecido como **flyback** (WALENDORFF, 2017).

Antes da popularização das TVs e monitores de LCD e plasma, era comum a utilização de monitores do tipo CRT (“cathode ray tube”, ou tubo de raios catódicos), cujo funcionamento depende da emissão de elétrons em alta

velocidade contra uma tela de fósforo (BURGOS ELETRÔNICA, 2016). Na Figura 17 se vê um esquema simplificado de um tubo de raios catódicos (CRT), onde estão representados seus principais componentes:

**Figura 17:** Esquema simplificado de um CRT.



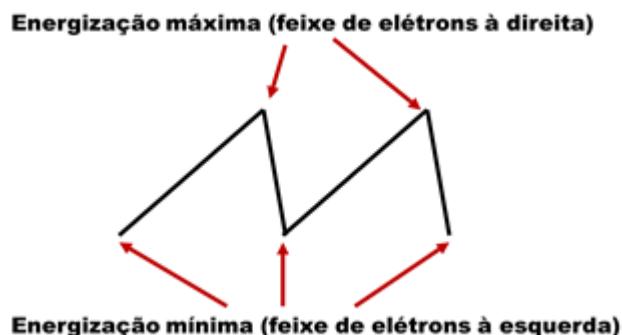
Na Figura 17, temos os seguintes componentes de um CRT representados.

1. Tela – Possui camadas de fósforo em três cores diferentes (vermelho, verde e azul) que reagem ao feixe de elétrons produzindo luz;
2. Canhão de elétrons – Produz o feixe de elétrons em alta velocidade;
3. Feixe de elétrons;
4. Bobinas de deflexão eletrostática vertical – Conduzem o feixe de elétrons na tela de cima para baixo;
5. Bobinas de deflexão eletrostática horizontal – Conduzem o feixe de elétrons na tela da esquerda para a direita.

A função do flyback em um tubo de raios catódicos é gerar a alta tensão que alimenta as bobinas de deflexão horizontal, e isso se deve à sua capacidade de gerar sinais do tipo “dente de serra” (BURGOS ELETRÔNICA, 2016).

Quando a bobina de deflexão horizontal está em seu menor nível de energia, o feixe de elétrons está completamente à esquerda de tela. Ao passo em que o transformador carrega a bobina, o feixe vai sendo conduzido para a direita. Quando a energização chega ao seu máximo, a bobina é descarregada abruptamente, fazendo com que o feixe retorne rapidamente para a esquerda, daí o nome “flyback”, que quer dizer algo como “voar de volta” (BURGOS ELETRÔNICA, 2016). Este processo está representado na Figura 18.

**Figura 18:** Representação simbólica do “voo de volta” em um flyback



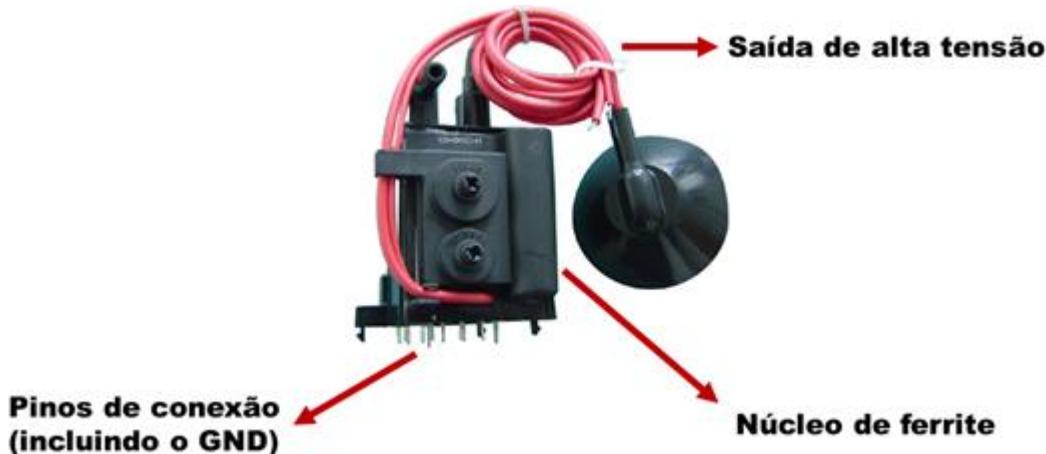
A construção do flyback é completamente pensada para sua aplicação em CRTs de monitores de vídeo (WALENDORFF, 2014). No entanto, para os fins deste trabalho, nos atentaremos apenas a algumas de suas características.

O flyback conta com alguns pinos de conexão, cujas funções estão associadas ao controle do próprio transformador, o mais importante deles é o GND, que usaremos para aterrizar o dispositivo (WALENDORFF, 2014).

Além dos pinos, o flyback possui uma saída de alta tensão (que usaremos para gerar a centelha elétrica), e um núcleo de ferrite que tem a função de conduzir o fluxo magnético das bobinas do transformador (WALENDORFF, 2014).

A imagem de um dispositivo flyback é dada na Figura 19.

**Figura 19:** Imagem de um flyback. Fonte: (MUNDIAL COMPONENTES, 2022)



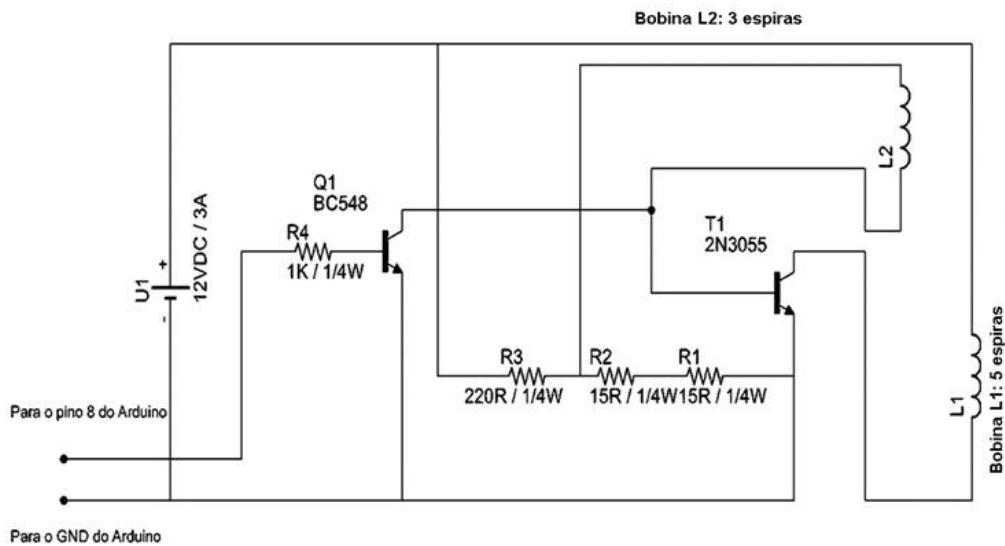
### 3.3 O circuito oscilador

O segundo módulo do qual trataremos é o circuito que torna possível o funcionamento do flyback, pois, como dito anteriormente, a bobina secundária de um transformador só é excitada por um campo magnético variável. No projeto original da Bobina de Tesla, essa variação é produzida pela descarga intermitente de um banco de capacitores, porém no dispositivo pretendido por este trabalho utilizaremos um circuito transistorizado com duas bobinas retroalimentadas. Os materiais utilizados para a construção do circuito são:

- 01 transistor 2N3055;
- 01 transistor BC548B;
- 01 resistor de 1K / 1/4W (marrom, preto, vermelho, dourado);
- 02 resistores de 15Ω / 1/4W (marrom, verde, preto, dourado);
- 01 resistor de 220 Ω / 1/4W (vermelho, vermelho, marrom, dourado);
- 01 placa universal perfurada (para montagem do circuito)

- Pedaços diversos de fios de cobre de 1,5mm<sup>2</sup> nas cores preta e vermelha, ambos com aproximadamente 40cm de comprimento;
- Pedaços diversos de fios de cobre de 0,5mm<sup>2</sup> no comprimento total de 30cm (para algumas ligações no circuito);
- 02 jumpers macho-macho para matriz de contato (“protoboard”), para comunicação com o Arduino;
- 04 conectores do tipo “jacaré”;
- 04 parafusos com porca (para união da placa com as bobinas);
- 01 fonte de alimentação de corrente contínua de 12V/2A.

**Figura 20:** Circuito de controle do oscilador. No circuito, a unidade resistência é  $R = 1 \Omega$  FONTE: WALLENDORF, 2014.



Na Figura 20 temos o esquema eletrônico do circuito oscilador. Perceba que além dos fios e fonte, os únicos componentes eletrônicos utilizados são transistores e resistores, sobre os quais falaremos a seguir.

### 3.3.1 Resistores

Na seção 2.1.1, definimos a resistividade como a grandeza que expressa a dificuldade da transmissão de uma corrente elétrica por um material. Quando, em um circuito eletrônico, desejamos limitar a intensidade da corrente que passa por determinada região, podemos utilizar componentes cuja resistividade possua um valor conhecido.

Na prática, um resistor tem a função de transformar a energia elétrica que passa por ele em energia térmica. Além da resistividade ( $\rho$ ) do material do qual este componente é feito, sua eficiência em dissipar a energia depende diretamente de seu comprimento ( $L$ ) e inversamente de sua seção transversal ( $A$ ), como explicitado na relação [5] (TIPLER, 2017).

$$R = \rho \frac{L}{A} \quad [5]$$

A grandeza  $R$  é chamada de **resistência**, e é ela que normalmente utilizamos para o dimensionamento dos resistores em um circuito, uma vez que é definida como quociente entre a tensão ( $V$ ) e a intensidade de corrente ( $I$ ) elétricas entre dois pontos de um circuito (TIPLER, 2017), conforme expresso na relação [6].

$$R \equiv \frac{V}{I} \quad [6]$$

A relação acima advém de uma relação equivalente descrita pela primeira vez no Século XIX pelo físico e matemático alemão Georg Simon Ohm, e em sua homenagem no sistema internacional a unidade de medida de resistência elétrica é chamada “ohm” (símbolo  $\Omega$ ).

Para este projeto, utilizaremos quatro resistores com três valores de resistência identificados por suas faixas coloridas, conforme a Figura 21. São eles:

- 01 Resistor de  $1\text{K}\Omega$  com 5% de tolerância (cores: marrom, preto, vermelho, dourado)
- 2 Resistores de  $15\Omega$  com 5% de tolerância (cores: marrom, verde, preto, dourado)
- 1 Resistor de  $220\Omega$  com 5% de tolerância (cores: vermelho, vermelho, marrom, dourado)

**Figura 21:** Resistores usados neste módulo do projeto.

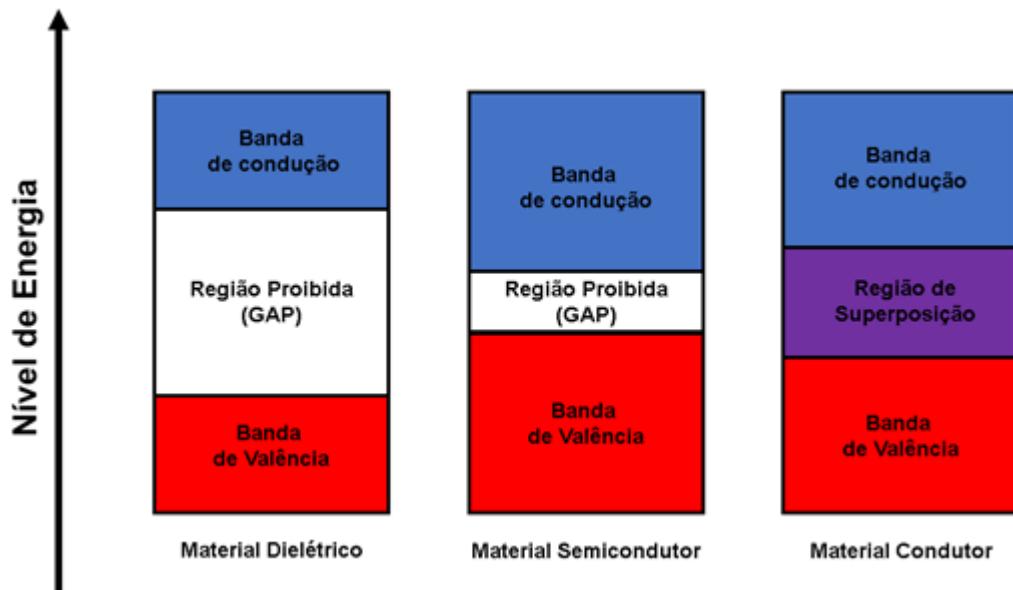


### 3.3.2. Transistores

Na seção 2.1.1 categorizamos os materiais em dois tipos, de acordo com sua permissividade em relação à passagem de corrente elétrica. No entanto, componentes eletrônicos geralmente são fabricados com materiais que apresentam características comuns a condutores e isolantes, a eles damos o nome de **semicondutores** (TIPLER, 2001).

Grosso modo, segundo a teoria de bandas, os semicondutores podem ser entendidos como dielétricos cuja banda (região) proibida é menor que os demais (TIPLER, 2001), conforme exemplificado na Figura 22.

**Figura 22:** Alguns tipos de estruturas de bandas diferenciando isolantes condutores e semicondutores.



Na Figura 22 se ilustra, à direita, o caso particular de um material condutor no qual existe uma região de superposição das bandas de valência e condução. Na Figura 22, à esquerda, se ilustram bandas de energia de um dielétrico genérico, onde existe um grande gap de energia. E no meio da Figura 22 se esquematiza a estrutura de banda de um semicondutor, com gap menor que o de um dielétrico.

Por não existir superposição entre as bandas de valência e condução, os semicondutores não conduzem naturalmente, porém, a curta distância entre essas regiões torna mais fácil que alguns elétrons de valência possam conduzir (TIPLER, 2001).

**Transistores** são os componentes eletrônicos que permitiram o avanço tecnológico dos computadores modernos (TIPLER, 2001; OLIVEIRA, 2021). Sua natureza híbrida, advinda do uso de materiais semicondutores, os torna

muito úteis no controle da passagem de corrente elétrica, uma vez que o mesmo componente pode atuar como “caminho” ou “barreira” para os elétrons.

Normalmente, os transistores possuem três terminais (TIPLER, 2001; OLIVEIRA, 2021):

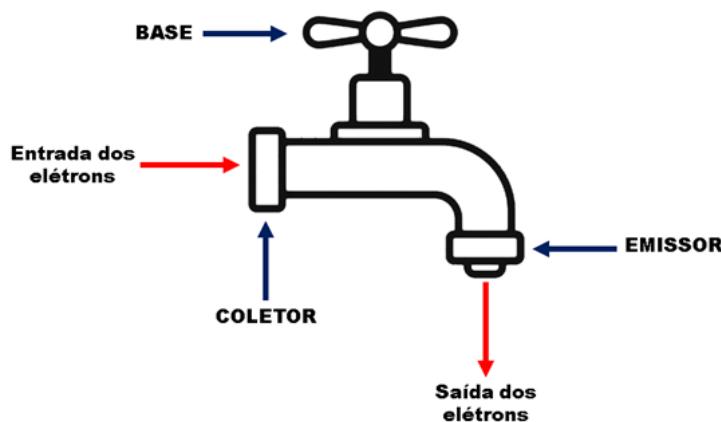
**Coletor** - responsável por receber a corrente elétrica;

**Emissor** - responsável por transmitir a corrente elétrica;

**Base** - responsável por controlar a passagem de corrente entre o coletor e o emissor.

A Figura 23 é uma representação que compara os transistores a uma “torneira de elétrons”, onde o coletor e o emissor são, respectivamente, a entrada e saída do fluxo eletrônico, enquanto a base faz o papel de válvula que controla este fluxo.

**Figura 23:** Analogia entre uma torneira e um transistor.



Existe vários tipos de transistores, e neste trabalho usaremos os de tipo TBJ, sigla para transistor bipolar de junção (TIPLER, 2001; OLIVEIRA, 2021).

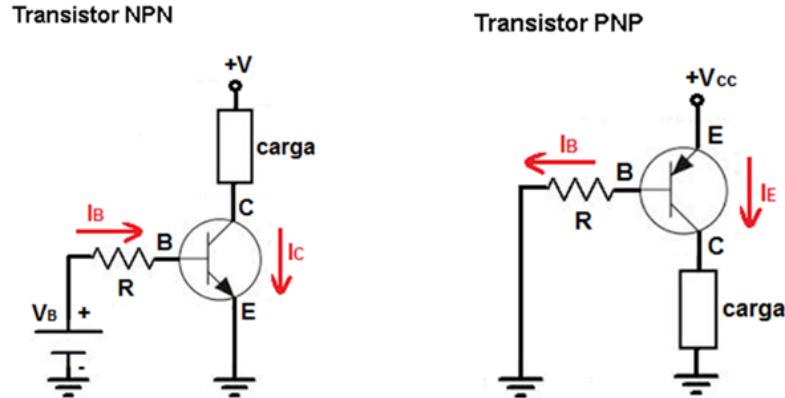
Os TBJs são separados em dois tipos diferentes, de acordo com a configuração da estrutura cristalina e dopagem dos materiais semicondutores que o compõem (TIPLER, 2001; OLIVEIRA, 2021). São construídos na forma de um sanduíche de cristais de silício com dopagens que alteram a natureza de seus portadores de carga majoritários. Sendo o cristal "N" rico em elétrons e o cristal "P" rico em "buracos", a saber, estados vazios de elétrons que funcionam como cargas positivas, podemos obter TBJs com duas configurações notáveis: NPN e PNP (TIPLER, 2001; OLIVEIRA, 2021).

- **Transistores NPN:** Esse tipo de transistor funciona como uma “torneira de elétrons” cuja posição natural é fechada, ou seja, aumentar a corrente na base seria o equivalente a abrir a válvula, permitindo cada vez mais o fluxo de elétrons entre coletor e emissor.
- **Transistores PNP:** Esse tipo de transistor funciona de maneira oposta ao anterior, ou seja, ele funciona como uma “torneira de elétrons” naturalmente aberta. À medida que a corrente diminui na base (flui da base para o terra), menor é o fluxo entre coletor e emissor.

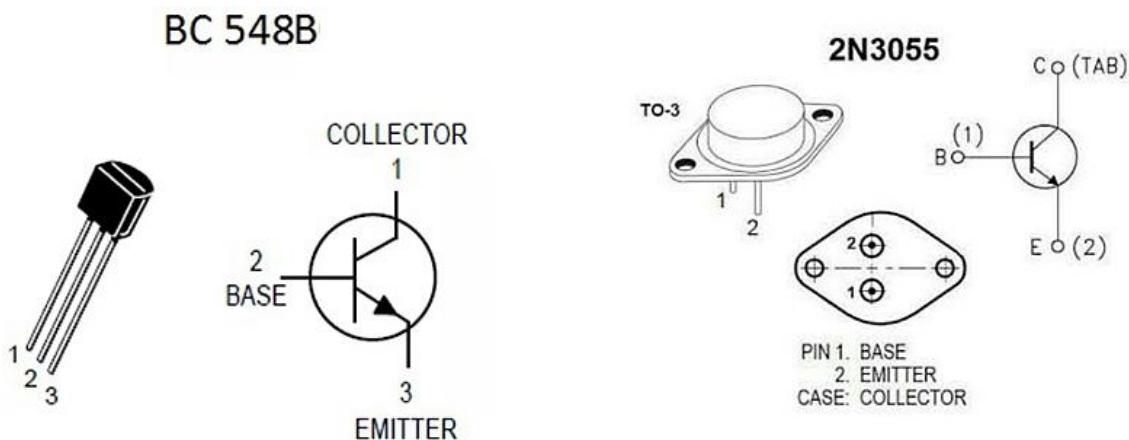
A Figura 24 apresenta as representações elétricas de transistores NPN e PNP em circuitos elétricos.

Para o nosso projeto, utilizaremos dois transistores do tipo NPN, são eles o **BC548B** (ARDUINO, 2022b) e o **2N3055** (ON SEMICONDUCTOR, 2022). Suas configurações estão representadas na Figura 25.

**Figura 24:** Representação dos transistores NPN e PNP em circuitos. FONTE: (LEARNING ABOUT ELECTRONICS, 2022)



**Figura 25:** Configurações dos transistores BC548B e 2N3055



### 3.3.3. Indutores

Outra parte integrante do circuito oscilador são os dois indutores que excitarão a bobina interna do flyback. Basicamente, um **indutor** (também chamado de solenoide) nada mais é que um condutor enrolado em espiras que possui a função de armazenar energia na forma de campos magnéticos (TIPLER, 2017). Como foi explicado na seção 3.1, os indutores recebem esse nome pela sua capacidade de induzir o surgimento de uma corrente elétrica em

outro condutor quando atravessados por uma corrente alternada ou intermitente.

Para o presente projeto, não utilizaremos indutores pré-fabricados. Ao invés disso, **os construiremos** com os fios de 1,5mm<sup>2</sup>. Os solenoides L1 e L2 terão respectivamente 5 e 3 espiras enroladas sobre o núcleo de ferrite exposto do flyback.

### 3.4. Plataforma Arduino

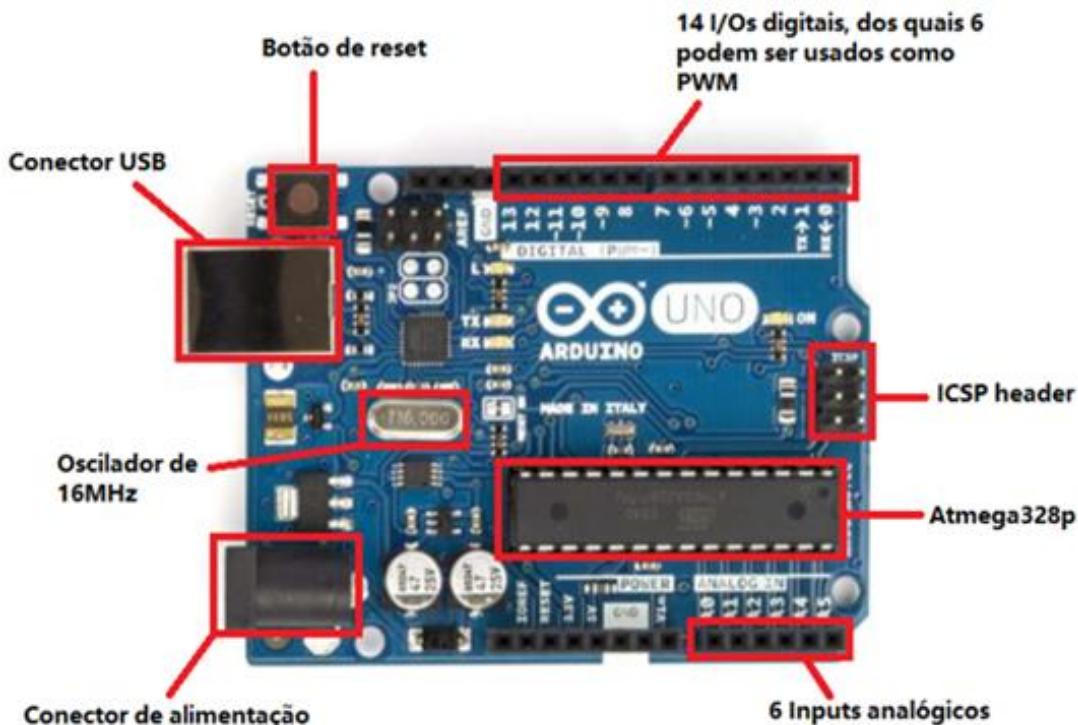
De forma controlar o processo de centelhamento, é preciso atuar sobre o equipamento elétrico descrito nas seções anteriores de forma a modular o processo de produção das centelhas e gerar música.

Par tanto, uma opção é a plataforma Arduino. Arduino é uma plataforma de programação relativamente simples e barata (ARDUINO, 2022; MONK, 2013). Segundo (FILIPEFLOP, 2022), a placa foi inicialmente concebida por cinco pesquisadores do *Instituto de Design de Interação de Ivrea* com o objetivo de ser um produto que interagisse com componentes eletrônicos reagentes a estímulos.

O Arduino possui várias versões, geralmente classificadas pelo seu tamanho e número de conexões, sendo o **Arduino UNO** tido como o padrão. Além dos conectores USB e de alimentação, essa placa conta com 3 saídas de tensão (duas de 5V e uma 3V), 6 saídas analógicas e 13 saídas digitais, além de outros conectores como o GND (terra). A Figura 26 mostra uma foto de uma placa Arduino UNO com identificação de partes relevantes.

**Figura 26:** Uma placa Arduino Uno com identificação de partes relevantes.

FONTE: (SALVADOR, 2022)



A linguagem de programação do Arduino é semelhante ao **C** e é feita através de uma interface própria para computador chamada de IDE, sigla para *Integrated Development Environment* (Ambiente de Desenvolvimento Integrado). A comunicação com a placa é via USB, e uma vez programada, consegue funcionar de forma independente (ARDUINO, 2022; MONK, 2013; FILIPEFLOP, 2022).

Para o projeto utilizaremos apenas as saídas digitais e o pino GND, além do cabo de alimentação. Posteriormente comentaremos sobre a programação e comunicação com os demais módulos.

### 3.5. Funcionamento pretendido para o dispositivo

#### 3.5.1. O oscilador Hartley

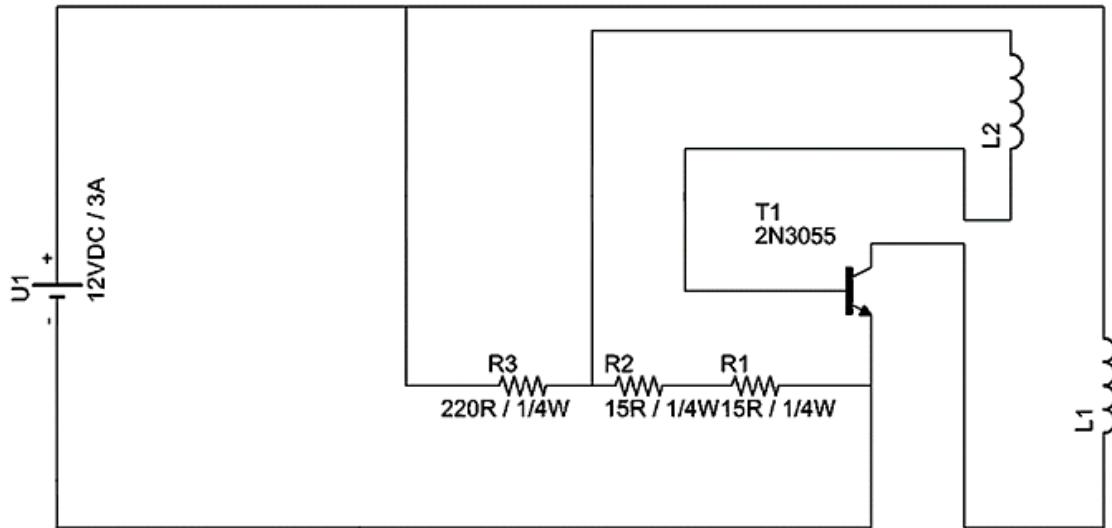
Tendo em vista o objetivo de gerar música a partir de arcos elétricos, dois requisitos devem ser atendidos: gerar alta tensão e modular a frequência das faíscas (SANTOS, 2014).

Num oscilador Hartley a realimentação é feita pela bobina de carga, tal que este tipo de circuito funciona até algumas dezenas de megahertz (BRAGA, 2022). Usaremos este oscilador, controlado pelo Arduino.

Para facilitar o entendimento deste processo de acionamento, consideremos uma alteração no esquema proposto em 3.3: excluir o transistor BC548B e o resistor de  $1\text{k}\Omega$  associado a ele, pois sua funcionalidade diz respeito à conexão com o Arduino. Esta configuração está no circuito na Figura 27.

Para que o flyback eleve a tensão, é necessário que sua bobina interna (que chamaremos de L3) seja excitada por um campo magnético variável. Como este circuito não conta com a descarga de capacitores para gerar um sinal intermitente, utiliza-se um sistema em que o transistor 2N3055 (T1) sirva como uma espécie de chave que liga e desliga L1.

**Figura 27:** Circuito modificado para permitir controle do centelhamento pelo Arduino UNO. No circuito, a unidade de resistência é  $R = 1 \Omega$ . FONTE: WALLENDORF, 2014



O funcionamento pode ser entendido seguindo os seguintes passos:

**PASSO 1:** O transistor T1 é do tipo NPN, portanto só transmite eletricidade entre coletor e emissor se sua base receber corrente o suficiente.

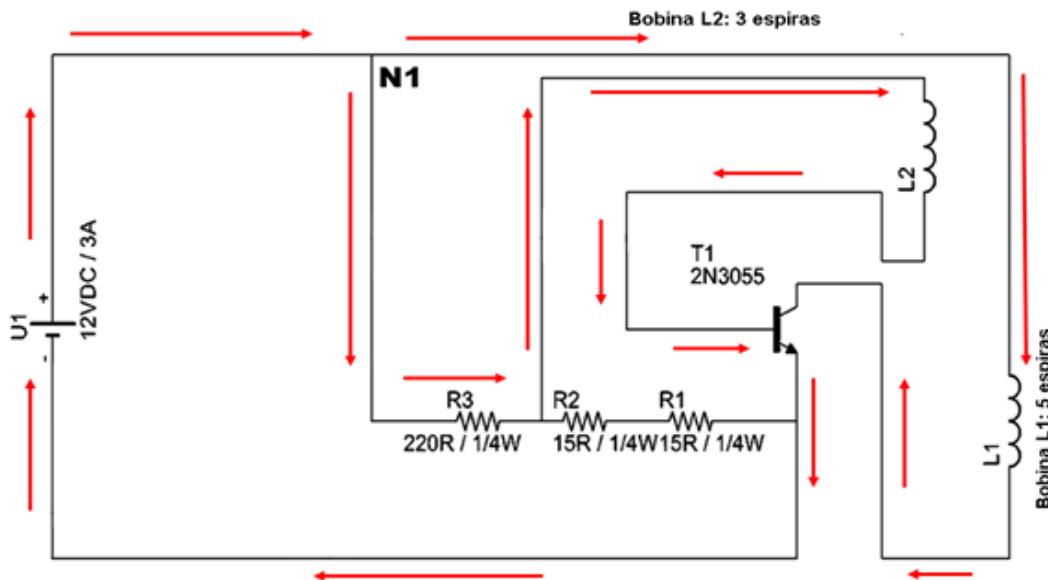
**PASSO 2:** A corrente que se divide em N1 alimenta L2 e consequentemente a base de T1, permitindo a transmissão do coletor para o emissor, fechando o circuito que aciona L1.

**PASSO 3:** Quando L1 é acionada, gera um campo magnético que excita a bobina (L3) do flyback ao mesmo tempo em que induz uma corrente inversa em L2.

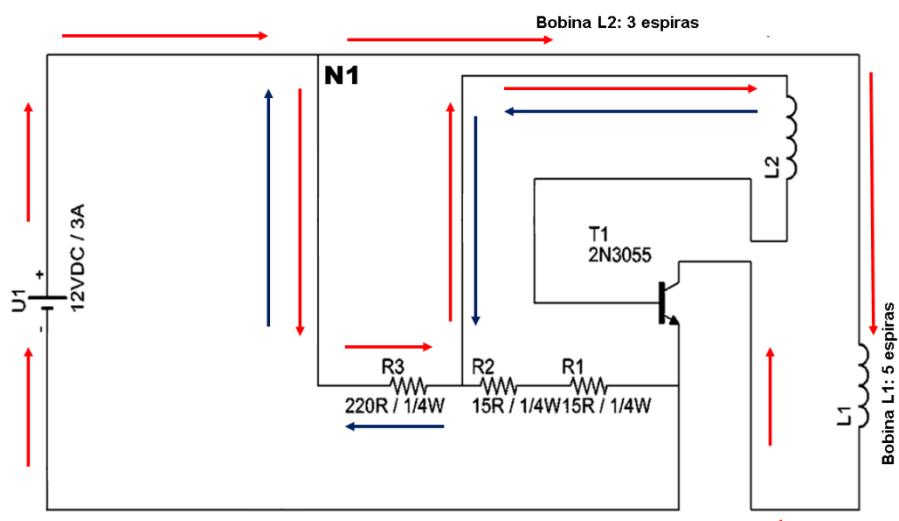
**PASSO 4:** Esta corrente inversa “cancela” a corrente inicial que alimenta a base de T1, desligando também L1, que para de excitar L3 e também L2, permitindo que o circuito retorne à configuração inicial.

Este processo está representado nas Figuras 28 e 29, onde as flechas azuis representam a corrente inversa gerada por L1 em L2. O ciclo descrito acima gera a variação necessária para excitar continuamente L3 em uma frequência alta e contínua.

**Figura 28:** Primeira etapa de operação. A unidade de resistência é  $R = 1 \Omega$ .



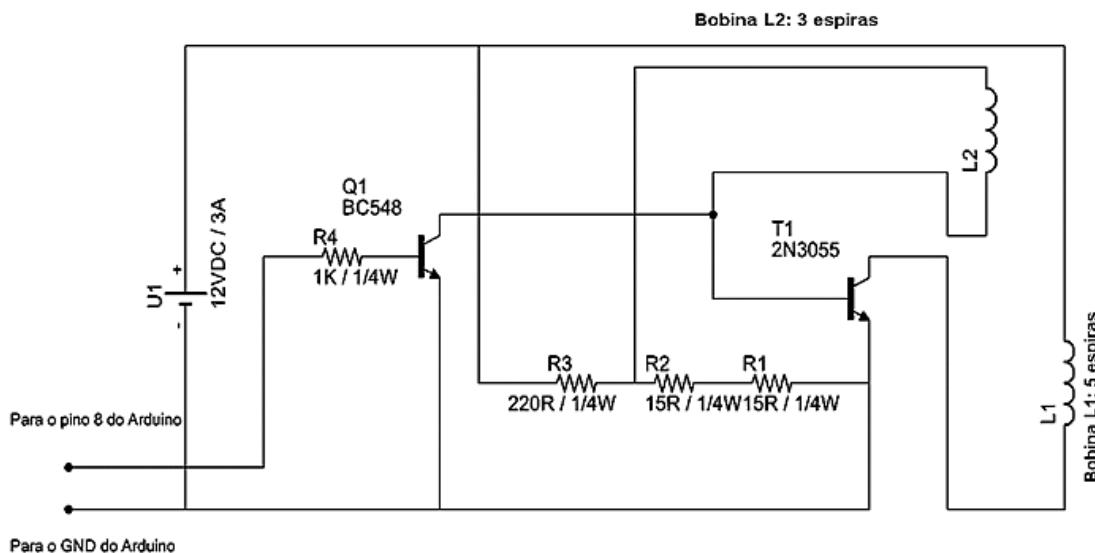
**Figura 29:** Segunda etapa de operação. A unidade de resistência é  $R = 1 \Omega$ .



### 3.5.2. A comunicação com o Arduino

Retornando ao esquema original, podemos observar que o transistor BC548 (Q1) tem seu coletor ligado ao terminal negativo de L2, seu emissor ligado ao terminal negativo de L1 e sua base ligada à saída de sinal do Arduino, conforme a Figura 30.

**Figura 30:** Circuito com as conexões com a placa Arduino UNO. A unidade de resistência é  $R = 1 \Omega$ .



Se a base de Q1 estiver recebendo corrente do Arduino, ele permite a passagem de corrente para seu emissor, que contrapõe a corrente que vem do terminal negativo de L1, impedindo seu funcionamento. Desta forma, o Arduino pode controlar o ciclo de “liga e desliga das bobinas”, e, portanto, sua frequência, bastando apenas alimentar ou não a base de Q1.

E, com estes materiais e métodos, podemos gerar um centelhamento no ar, controlado eletronicamente quanto à sua frequência.

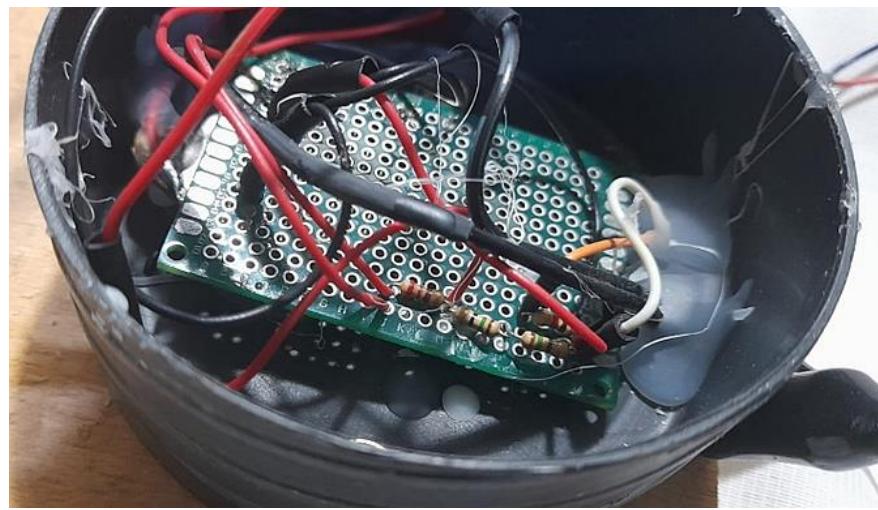
## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A partir da metodologia e dos materiais planejados no Capítulo 3, se construiu efetivamente o módulo demonstrativo. Apresenta-se a seguir os detalhes das montagens e estas, como resultados.

### 4.1. Montagem do circuito oscilador, flyback e centelhador

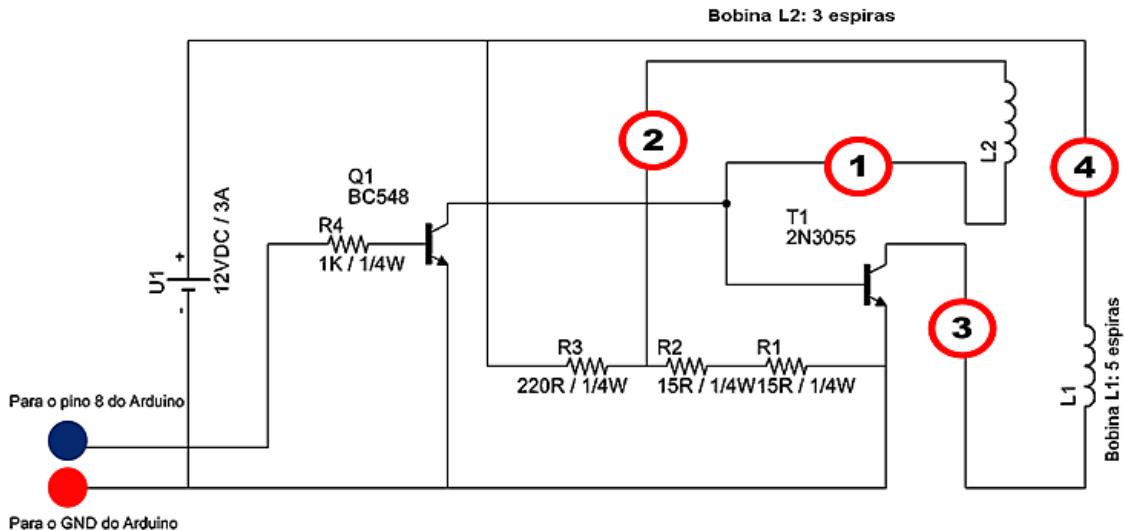
O primeiro passo para a montagem do dispositivo é a soldagem dos transistores e resistores à placa universal segundo o esquema eletrônico da seção 3.3, utilizando os fios de 0,5mm<sup>2</sup> para algumas conexões. Após a soldagem dos componentes eletrônicos, jumpers e fonte à placa, a mesma foi colada no fundo de um recipiente plástico, cujo resultado está na Figura 31.

**FIGURA 31:** Placa já montada e colada ao fundo de um recipiente plástico



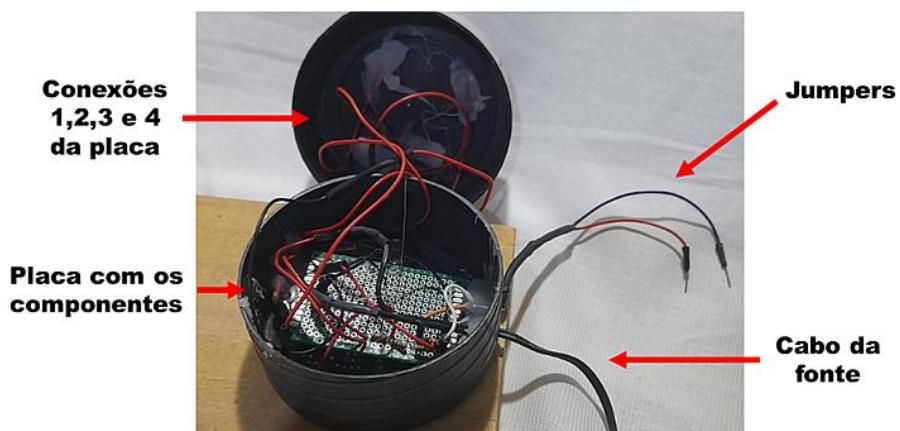
Como a construção dos indutores L1 e L2 demanda a utilização dos fios de 1,5mm<sup>2</sup>, suas conexões com a placa precisaram ser seccionadas nos pontos destacados no esquema a seguir.

**Figura 32:** Pontos de seccionamento no circuito da placa. A unidade de resistência é  $R = 1 \Omega$ .

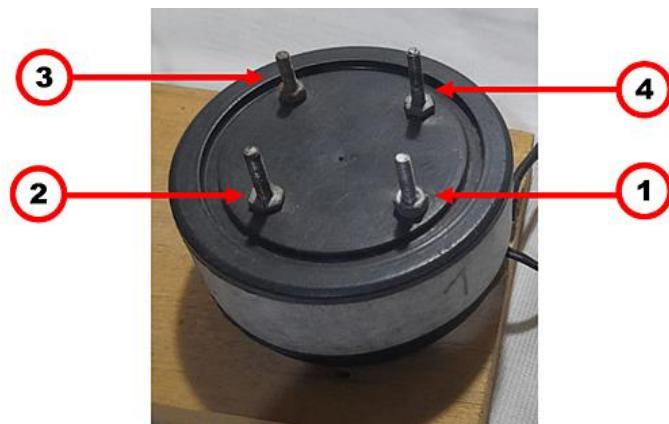


Os pontos 1, 2, 3 e 4 na Figura 32 marcam a divisão entre os indutores e o restante do circuito. Nesses pontos, os terminais da placa foram soldados a parafusos na tampa do recipiente plástico. Os círculos azul e vermelho no esquema representam os jumpers macho-macho que permitirão a conexão e a comunicação com o Arduino UNO. Este resultado pode ser visto nas Figuras 33 e 34.

**Figura 33:** Pontos de derivação para conexão com o Arduino UNO.

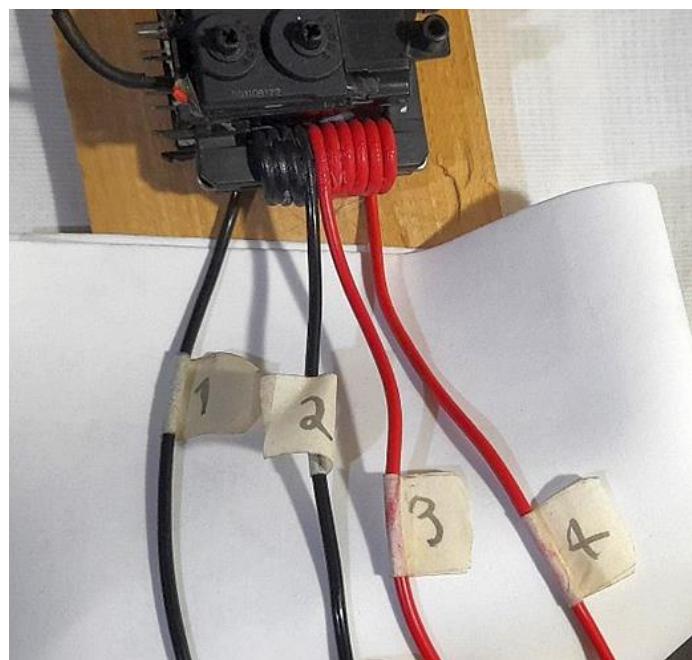


**Figura 34:** Vista dos parafusos com as conexões neste módulo.



A etapa seguinte é enrolar os fios de 1,5mm<sup>2</sup> em torno do núcleo de ferrite do flyback, cujo resultado está na Figura 35. Nas extremidades se soldam os conectores tipo “garra jacaré” para formar seus terminais, mostrados na Figura 36, os quais servirão para conexão com os parafusos vistos na Figura 34.

**Figura 35:** Enrolamentos (solenoides) nos núcleos de ferrite do flyback



**Figura 36:** Um dos terminais das bobinas, sendo todos também na forma de conectores garra jacaré.



Um detalhe importante nesta etapa é atentar-se ao sentido de enrolamento dos fios:

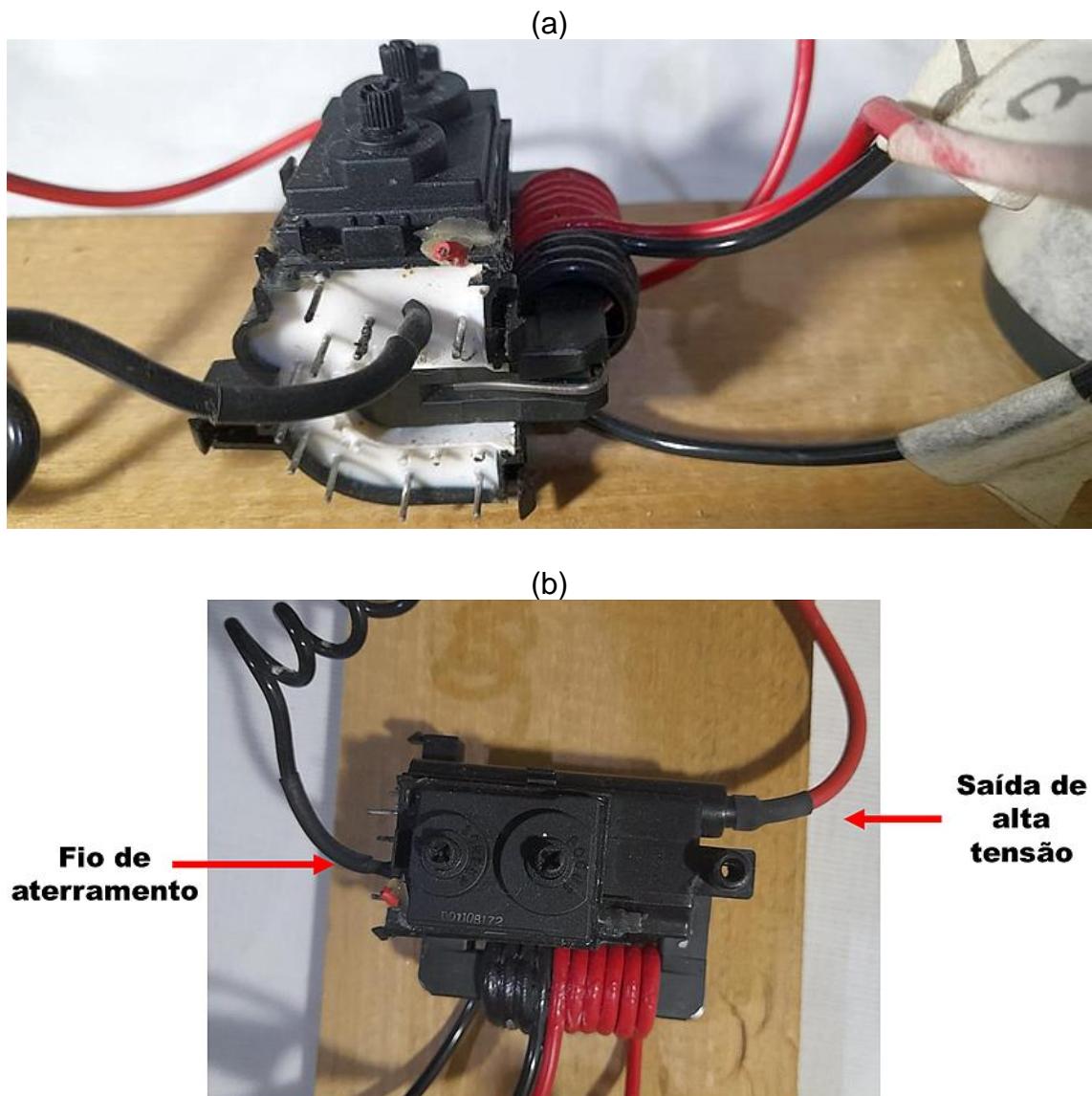
1. A bobina L2 (fio preto) é enrolada 3 vezes, a começar da esquerda e por baixo do núcleo do flyback;
2. A Bobina L1 (fio vermelho) é enrolada 5 vezes, a começar da esquerda por cima do núcleo do flyback.

No flyback utilizaremos o segundo pino (no sentido anti-horário) para soldar o fio de aterramento e aproveitaremos a própria saída de alta tensão para gerar o centelhamento, conforme a Figura 37.

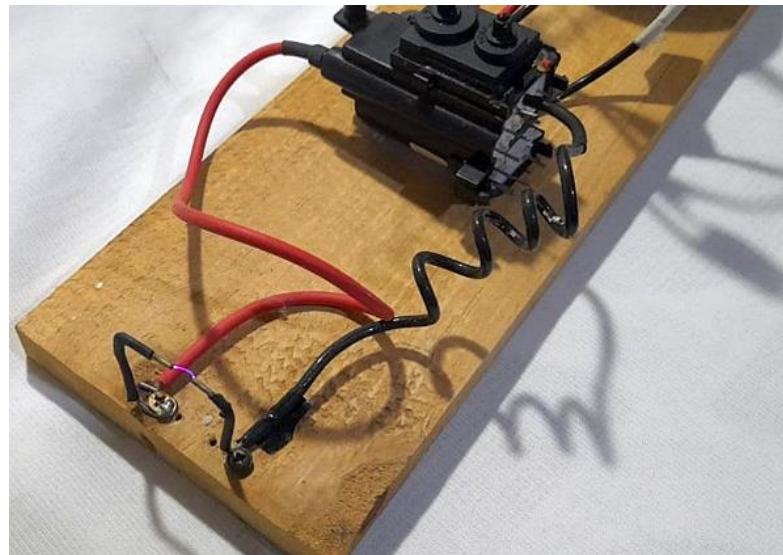
A última etapa para a construção do dispositivo é soldar as saídas do flyback aos eletrodos entre os quais serão formados de forma controlada o centelhamento e o respectivo som. Os eletrodos são formados por dois pedaços de fio rígido de  $1\text{mm}^2$  com as pontas desencapadas e postas frontalmente uma contra a outra, montados conforme a Figura 38.

O Sistema elétrico completo, montado, pode ser visto em foto na Figura 39.

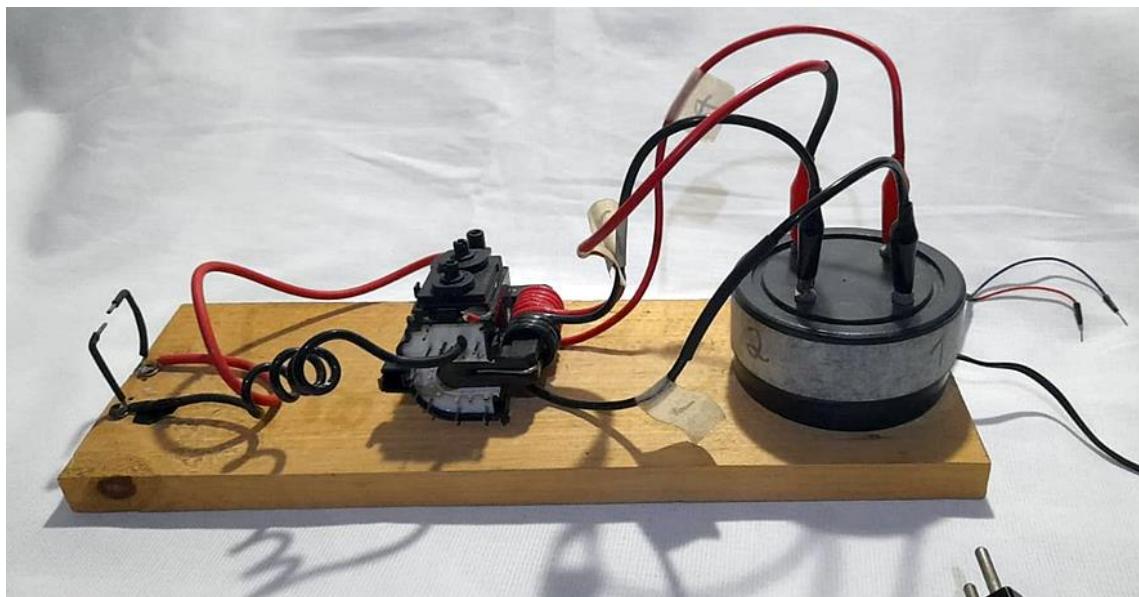
**Figura 37:** Saídas do flyback, com o Fio de aterramento soldado ao segundo pino. (a) Vista Lateral. (b) Vista superior.



**Figura 38:** Montagem dos eletrodos no módulo, relativos ao flyback.



**Figura 39:** O sistema completo montado.



#### 4.2. Programação do Arduino UNO

Antes de escrever as músicas na programação do Arduino, deve-se primeiramente instalar uma **biblioteca** ao IDE (ARDUINO, 2022c).

Bibliotecas permitem o uso de funções adicionais, não presentes na linguagem de programação original e assim permitem novas possibilidades na programação. São declaradas no início do programa, como cabeçalhos de programação que incluem informações de uso específico.

Como o objetivo deste trabalho é reproduzir músicas através de centelhamentos, como forma lúdica de relacionar o centelhamento a ser produzido com o fenômeno natural de raios e trovões, é conveniente usar uma biblioteca que associe notas musicais a suas respectivas frequências sonoras. Desta forma, ao digitarmos o código de uma música, não precisamos escrever essas frequências repetidamente.

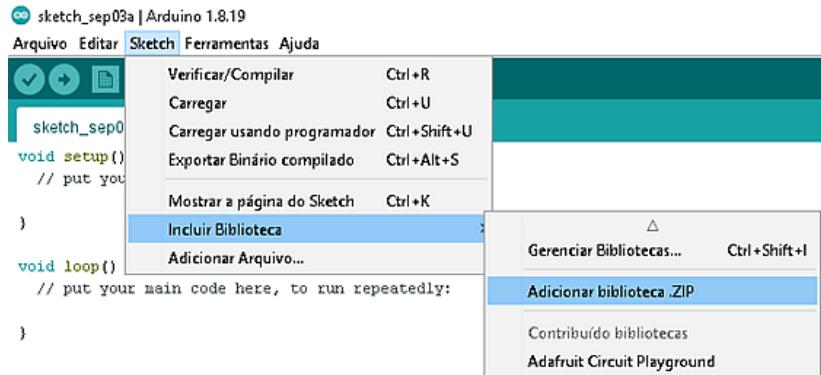
A biblioteca que realiza a função em questão é nomeada **pitches.h**, que pode ser obtida em repositório na Internet (GITHUB, 2022.)

Cada música desejada de ser reproduzida após o carregamento da biblioteca pitches.h.

Após adicionar a biblioteca previamente baixada no formato \*.zip (PITCHES.ZIP, 2022), as músicas podem ser escritas, isto é, seu código para o sistema Arduino UNO com a biblioteca pitches.h. Sugerimos baixar estes códigos de músicas já prontos de repositórios na Internet (DRAGÃO SEM CHAMA, 2022.)

A Figura 40 mostra como carregar a biblioteca no IDE do Arduino UNO a partir de um arquivo tipo \*.zip.

**Figura 40:** Carregamento de biblioteca em formato \*.zip na IDE do Arduino UNO.



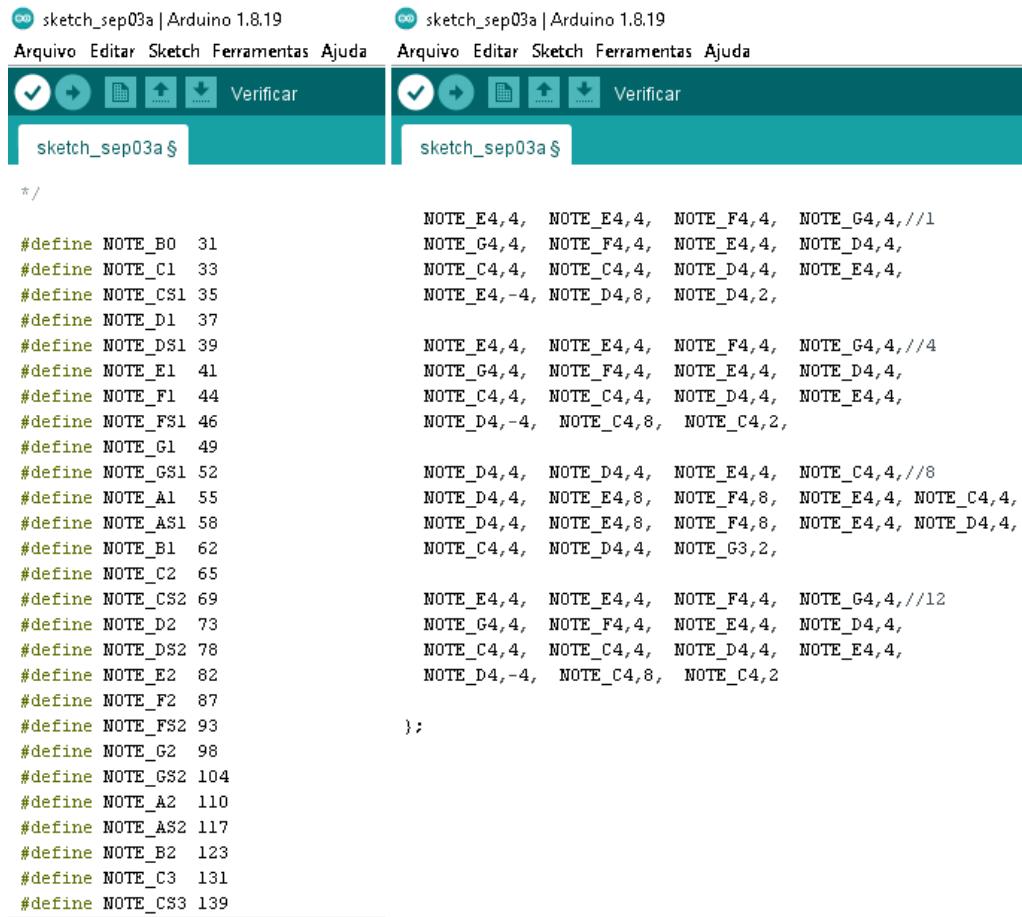
Na Figura 41 se apresenta, como exemplo, o código que reproduz a música “*Ode to Joy*” (“*Ode à Alegria*”), de Ludwig van Beethoven (COUTO, 2022).

A Figura 41 mostra duas partes subsequentes do mesmo código. Na primeira tela, à esquerda na Figura 41, o compositor pode definir a própria nomenclatura para as notas, como achar mais conveniente. Na segunda imagem, à direita na Figura 41, está a música em si.

O comando “NOTE”, instrui o Arduino para tocar a nota no pino pré-definido (Pino 8), qual é a nota a ser tocada e sua duração em milissegundos.

Tendo a música já escrita, o programa deve ser compilado, conforme a Figura 42.

**Figura 41:** Código para a música “Ode to Joy” de Ludwig van Beethoven.



```

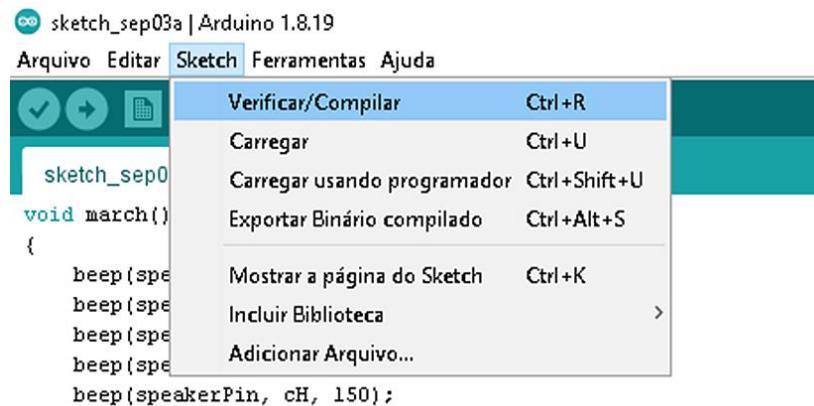
sketch_sep03a | Arduino 1.8.19          sketch_sep03a | Arduino 1.8.19
Arquivo Editar Sketch Ferramentas Ajuda  Arquivo Editar Sketch Ferramentas Ajuda
Verificar Verificar
sketch_sep03a $ sketch_sep03a $

/*
#define NOTE_B0 31
#define NOTE_C1 33
#define NOTE_CS1 35
#define NOTE_D1 37
#define NOTE_DS1 39
#define NOTE_E1 41
#define NOTE_F1 44
#define NOTE_FS1 46
#define NOTE_G1 49
#define NOTE_GS1 52
#define NOTE_A1 55
#define NOTE_AS1 58
#define NOTE_B1 62
#define NOTE_C2 65
#define NOTE_CS2 69
#define NOTE_D2 73
#define NOTE_DS2 78
#define NOTE_E2 82
#define NOTE_F2 87
#define NOTE_FS2 93
#define NOTE_G2 98
#define NOTE_GS2 104
#define NOTE_A2 110
#define NOTE_AS2 117
#define NOTE_B2 123
#define NOTE_C3 131
#define NOTE_CS3 139

NOTE_E4,4, NOTE_E4,4, NOTE_F4,4, NOTE_G4,4,//1
NOTE_G4,4, NOTE_F4,4, NOTE_E4,4, NOTE_D4,4,
NOTE_C4,4, NOTE_C4,4, NOTE_D4,4, NOTE_E4,4,
NOTE_E4,-4, NOTE_D4,8, NOTE_D4,2,
NOTE_E4,4, NOTE_E4,4, NOTE_F4,4, NOTE_G4,4,//4
NOTE_G4,4, NOTE_F4,4, NOTE_E4,4, NOTE_D4,4,
NOTE_C4,4, NOTE_C4,4, NOTE_D4,4, NOTE_E4,4,
NOTE_D4,-4, NOTE_C4,8, NOTE_C4,2,
NOTE_D4,4, NOTE_D4,4, NOTE_E4,4, NOTE_C4,4,//8
NOTE_D4,4, NOTE_E4,8, NOTE_F4,8, NOTE_E4,4, NOTE_C4,4,
NOTE_D4,4, NOTE_E4,8, NOTE_F4,8, NOTE_E4,4, NOTE_D4,4,
NOTE_C4,4, NOTE_D4,4, NOTE_G3,2,
NOTE_E4,4, NOTE_E4,4, NOTE_F4,4, NOTE_G4,4,//12
NOTE_G4,4, NOTE_F4,4, NOTE_E4,4, NOTE_D4,4,
NOTE_C4,4, NOTE_C4,4, NOTE_D4,4, NOTE_E4,4,
NOTE_D4,-4, NOTE_C4,8, NOTE_C4,2
);

```

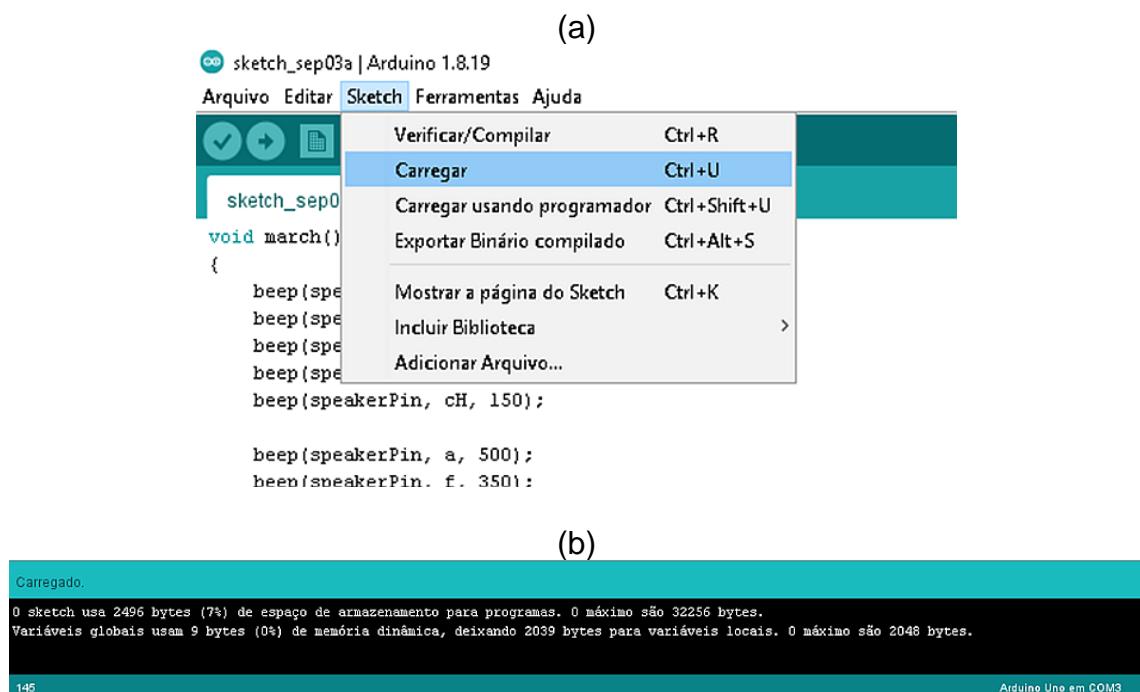
**Figura 42:** Compilação de um programa na IDE do Arduino UNO.



Em seguida, com o Arduino UNO conectado na entrada USB do computador, o programa já pode ser carregado para a memória da placa Arduino UNO, conforme a Figura 43.

**Figura 43:** Carregamento de um programa na memória do Arduino UNO.

(a) Selecionando o comando para carregar. (b) Mensagem que informa que o carregamento foi feito com sucesso.

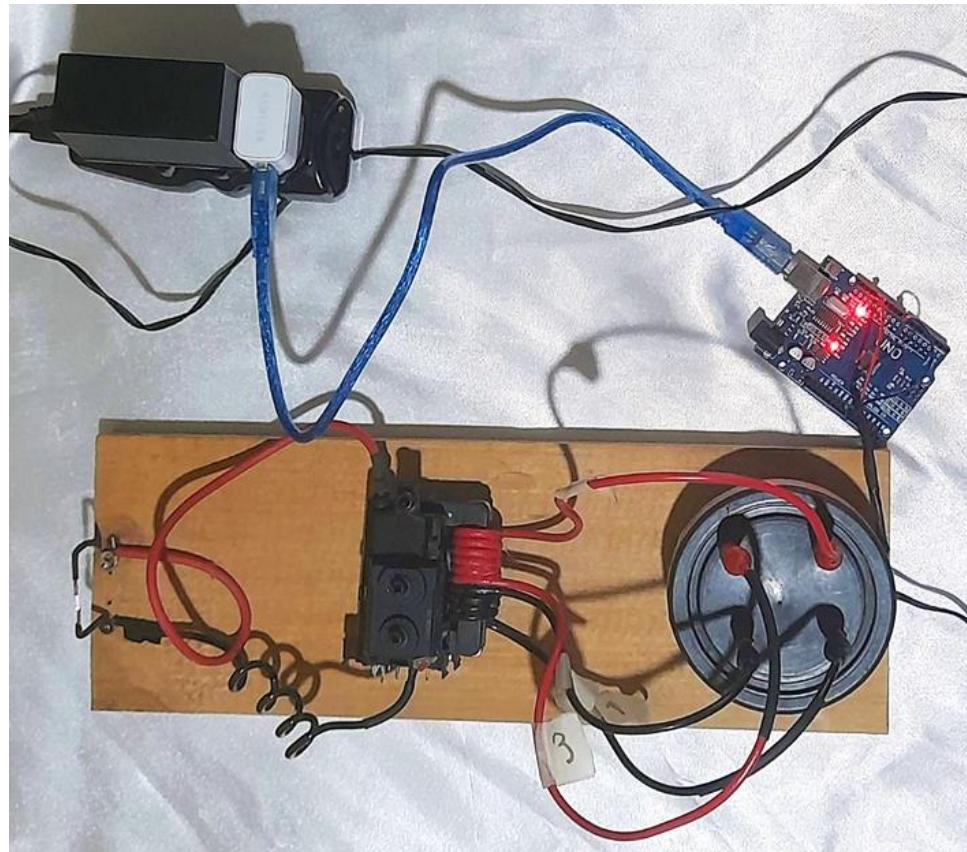


Depois de adicionar a música ao Arduino UNO, basta conectá-lo aos jumpers do circuito oscilador e ligar o dispositivo para que o programa seja executado.

#### 4.3. Teste do módulo de reprodução de músicas por centelhamentos controlados.

Na Figura 44 apresentamos uma foto do sistema todo montado e em operação.

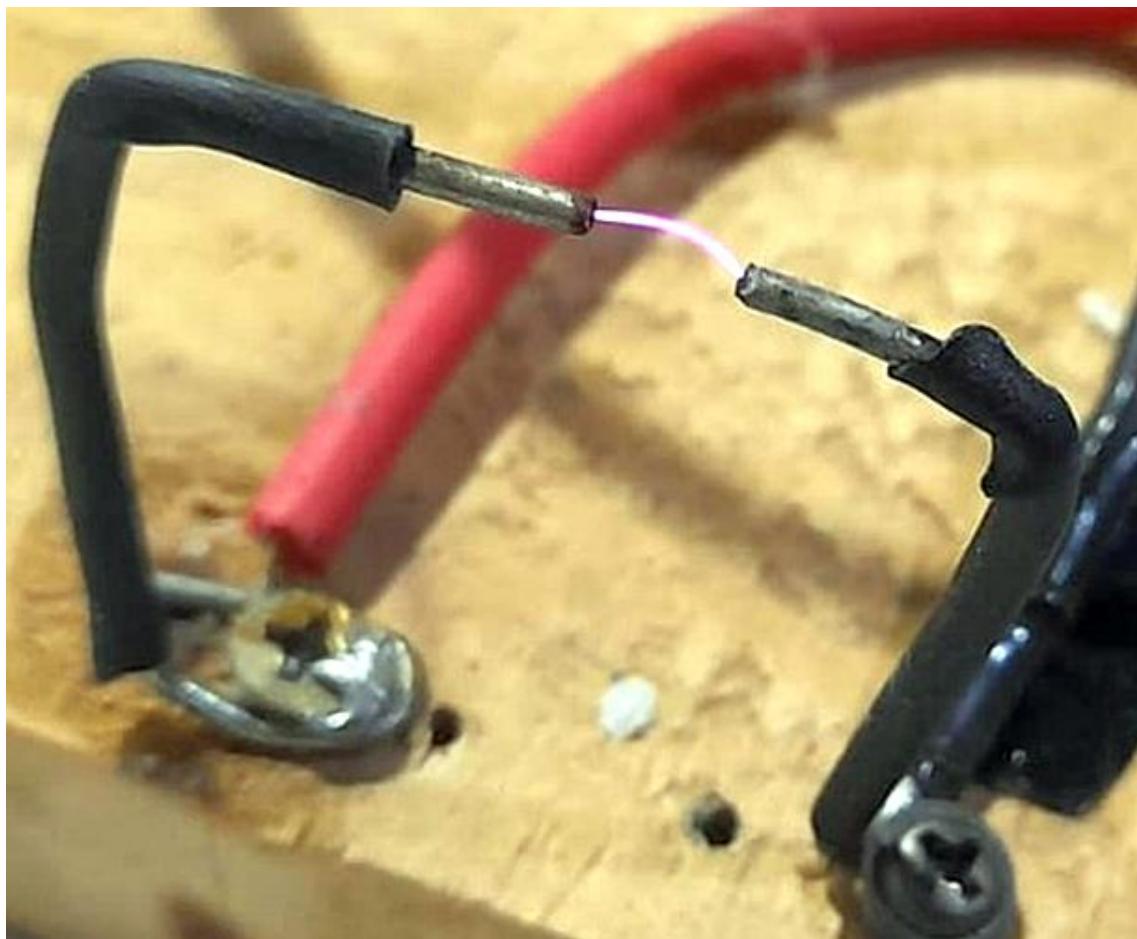
**Figura 44:** Foto do sistema montado e em operação. Nota-se o centelhamento controlado pelo Arduino para reproduzir uma música claramente audível.



O sistema funcionou perfeitamente em todos os testes e reproduziu a programação contendo as músicas a partir do centelhamento controlado. As reproduções foram claramente audíveis.

A Figura 45 apresenta um detalhe do centelhamento enquanto se tocava a “Ode to Joy” de Ludwig van Beethoven.

**Figura 45:** Detalhe mostrando o centelhamento gerado de forma controlada para reproduzir uma música claramente audível.



Desta forma foi verificada a operacionalidade do módulo experimental para reproduzir músicas a partir de um centelhamento controlado por Arduino UNO, que pode ser usado de forma lúdica para promover a discussão sobre a formação de relâmpagos e trovões na atmosfera.

## 5. CONCLUSÕES E PROPOSTAS

### 5.1 Conclusões

Com esta Monografia de Conclusão de curso de Licenciatura em Física, obtivemos diversos resultados. Foi produzido um texto didático sobre os museus de ciência e sua importância para o ensino da Física. Foi produzido um texto didático sobre a Física da produção de relâmpagos e trovões. Foi projetado um equipamento demonstrativo lúdico sobre a produção de centelhamentos no ar com a reprodução controlada de música por este fenômeno. Foi construído, testado e comprovada a operação deste módulo, apto a ser usado em centros e museus de ciência.

### 5.2 Propostas de continuidade

Como continuidade deste trabalho, propomos a criação de um pôster com infográfico explicando a formação de relâmpagos e trovões e do módulo em si.

Outra proposta de continuidade é desenvolver um módulo adicional que permita a um usuário selecionar em uma lista a música que desejava ouvir produzida pelo centelhamento.

Como continuidade, seria importante o uso efetivo deste material em um centro ou museu de ciência, ou feira de demonstração para o público, de forma a estudar o efeito desta demonstração lúdica sobre o processo de aprendizado da Física da formação de relâmpagos e trovões.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABCMC. **Centros e museus de ciência do Brasil 2015.** Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Centros e Museus de Ciência: UFRJ.FCC. Casa da Ciência; Fiocruz. Museu da Vida, 2015.

ADOBE. Cumuluninbus images. Disponível em: <[https://t4.ftcdn.net/jpg/03/17/80/77/240\\_F\\_317807766\\_aWfoR2kUsGINSWofm3lvgTvd0zhvMrem.jpg](https://t4.ftcdn.net/jpg/03/17/80/77/240_F_317807766_aWfoR2kUsGINSWofm3lvgTvd0zhvMrem.jpg)>. Acesso em: 10 ago. 2022.

ARDUINO. ArduinoHome. Disponível em: <<https://www.arduino.cc/>>. Acesso em: 10 jul. 2022 (2022a).

ARDUINO. BC546B, BC547A, B, C, BC548B, C Amplifier Transistors: NPN Silicon DATASHEET. Disponível em: <<https://www.arduino.cc/documents/datasheets/BC547.pdf>>. Acesso em: 10 mai. 2022 (2022b).

ARDUINO. Installing Libraries. Disponível em: <<https://docs.arduino.cc/software/ide-v1/tutorials/installing-libraries>>. Acesso em: 10 jul. 2022 (2022c).

ARTHURY, Luiz Henrique Martins, PAGANELLI, Eduardo, GORGES NETO, Leopoldo, DUMS, Egon Henrique. Uma Bobina de Tesla de alta potência para o ensino de física. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, vol. 44, e20220059 (2022).

BRAGA, Newton C.. Oscilador Hartley (Cálculo M007). Disponível em: <<https://newtoncbraga.com.br/feature/438>>. Acesso em: 10 mai. 2022.

BURGOS ELETRONICA. Funcionamento da TV CRT 1, (25 nov. 2016) Disponível em <<https://www.youtube.com/watch?v=-cYQEZjMHNA>>. Acesso em: 14 ago. 2022.

COUTO, Robson. Arduino Songs – Ode to Joy. Disponível em: <<https://github.com/robsoncouto/arduino-songs/blob/master/odetojoy/odetojoy.ino>>. Acesso em 3 set 2022.

DRAGÃO SEM CHAMA. Músicas para Arduino. Disponível em: <<https://dragaosemchama.com/2019/02/musicas-para-arduino/>>. Acesso em 3 set. 2022.

FILIPEFLOP. O que é Arduino, para que serve e primeiros passos. Disponível em: <<https://www.filipeflop.com/blog/o-que-e-arduino/>>. Acesso em: 10 mai. 2022.

FIORATTI, Carolina. Incidência de raios no Brasil deve chegar a 100 milhões por ano no fim do século. Disponível em: <<https://super.abril.com.br/ciencia/incidencia-de-raios-no-brasil-deve-chegar-a-100-milhoes-por-ano-no-fim-do-seculo/>>. Acesso em: 10 jul. 2022.

FRAZÃO, Dilva. Nikola Tesla - Inventor austro-húngaro. Disponível em: <[https://www.ebiografia.com/nikola\\_tesla/](https://www.ebiografia.com/nikola_tesla/)>. Acesso em 12 ago. 2022

GASPAR, Alberto. **Museus e centros de ciências** – conceituação e proposta de um referencial teórico. Tese para obtenção do título de doutor na área de Didática, USP: São Paulo, 1993.

GASPAR, Alberto. **Atividades experimentais no Ensino de Física.** 1<sup>a</sup> ed. – São Paulo: Editora Livraria da Física, 2014.

GITHUB. Pitches.h. Disponível em: <<https://gist.github.com/mikeputnam/2820675>>. Acesso em: 3 set. 2022.

HANGAR33. Saiba tudo que acontece quando uma avião quebra a barreira do som. Disponível em: <<http://blog.hangar33.com.br/saiba-tudo-que-acontece-quando-uma-aviao-quebra-a-barreira-do-som/>>. Acesso em: 14 ago. 2022.

HELERBROCK, Rafael. Rigidez dielétrica. Disponível em: <<https://mundoeducacao.uol.com.br/fisica/a-rigidez-dieletrica.htm>>. Acesso em: 10 ago. 2022 (2022a).

HELERBROCK, Rafael. Transformadores. Disponível em: <<https://mundoeducacao.uol.com.br/fisica/transformadores.htm>>. Acesso em 12 ago. 2022 (2022b).

HELERBROCK, Rafael. O que é efeito Doppler?; Brasil Escola. Disponível em: <<https://brasilescola.uol.com.br/o-que-e/fisica/o-que-e-efeito-doppler.htm>>. Acesso em: 10 ago. 2022 (2022c).

JUNIOR, Joab Silas da Silva. Hans Christian Oersted. Disponível em: <<https://mundoeducacao.uol.com.br/fisica/hans-christian-oersted.htm>>. Acesso em: 12 ago. 2022 .

LEARNING ABOUT ELECTRONICS. Diferenças entre os transistores NPN e PNP. Disponível em:<<http://www.learningaboutelectronics.com/Artigos/Diferencia-entre-transistores-NPN-e-PNP.php>>. Acesso em: 10 mai. 2022.

MANO, Sonia, CAZELLI, Sibele, COSTA, Andréa Fernandes, DAMICO, José Sergio, SILVA, Loloano Claudionor da, CRUZ, Wailã de Souza, GUIMARÃES , V anessa Fernandes. Museus de ciência e seus visitantes: estudo longitudinal - 2005, 2009, 2013. Rio de Janeiro: Fundação Oswaldo Cruz / Casa de Oswaldo Cruz / Museu da Vida, 2017. Disponível em: <<http://www.omcct.fiocruz.br/images/pdf/Publicacao-OMCCT-LONGITUDINAL-2017-internet.pdf>>. Acesso em: 05 jun. 2022.

MACEDO, Horácio. **Dicionário de Física Ilustrado**. Rio de Janeiro: Nova Fronteira. 1976.

MARANDINO, Martha. Interfaces na relação museu-escola, **Caderno Catarinense de Ensino de Física** v. 18, n.1: p.85-100, abr. 2001.

MASSARANI, Luisa (org.). **Guia de Centros e Museus de Ciência da América Latina e do Caribe**. Rio de Janeiro: Museu da Vida/Casa de Oswaldo Cruz/Fiocruz; RedPOP; Montevidéu: Unesco, 2015. Disponível em: [https://www.museudavida.fiocruz.br/images/Publicacoes\\_Educacao/PDFs/GuiaAmericaLatinaPortugues.pdf](https://www.museudavida.fiocruz.br/images/Publicacoes_Educacao/PDFs/GuiaAmericaLatinaPortugues.pdf). Acesso em: 01 set. 2022.

MONK, Simon. **Programação com Arduino**: começando com sketches. Porto Alegre: Bookman, 2013.

MOREIRA, Marco Antônio. **Teorias de aprendizagem**. 2<sup>a</sup> ed. São Paulo: EPU, 1999.

MOREIRA, Marco Antonio. O que é afinal aprendizagem significativa?.

Disponível em:<<http://moreira.if.ufrgs.br/oqueeafinal.pdf>>. Acesso em: 06 abr. 2022.

MUNDO EDUCAÇÃO. Rrigidez dielétrica: o que é, dielétricos e efeito corona.

Disponível em:<<https://mundoeducacao.uol.com.br/fisica/a-rigidez-dieletrica.htm>>. Acesso em jun. 2022.

OLIVEIRA, Fabio Ferreira de; VIANNA, Deise Miranda; GERBASSI, Reuber Sc  
ofano Gerbassi. Física moderna no ensino médio: o que dizem os professores,  
**Revista Brasileira de Ensino de Física**. vol.29, no.3, 2007.

OLIVEIRA, Thiago. O que são transistores e quais tipos mais usados?, in: Eletrônica Geral (2021). Disponível em:<<https://eltgeral.com.br/o-que-sao-transistores-e-quais-tipos-mais-usados/>>. Acesso em: 10 jun. 2022.

ON SEMICONDUTOR. 2N3055(NPN), MJ2955(PNP) Preferred Device: Complementary Silicon Power Transistors DATASHEET. Disponível em: <<https://www.onsemi.com/pdf/datasheet/2n3055-d.pdf>>. Acesso em: 10 mai. 2022.

PEREIRA, Thiago Ramos. Mecanismos de Ruptura em Dielétricos. Disponível em <<https://xdocs.com.br/doc/6-mecanismos-de-ruptura-eletrica-em-dielectricos-vo9m9jgqxk8j>>. Acesso em: 10 jun 2022.

PITCHES.ZIP. Disponível em:<<https://drive.google.com/file/d/0B3HftVqWfJhcaEdmdzRVT2dXV3c/view?resourcekey=0-sCuBXXeB-wPkVPJdvbHQCg>>. Acesso em 3 set. 2022.

PRASS, Alberto Ricardo. ELETRICIDADE NA ATMOSFERA DA TERRA. Disponível em: <<https://fisica.net/electricidade/electricidade-na-atmosfera.php>>. Acesso em: 12 de ago. 2022.

REICH, Henry. MinuteEarth: Why Are There Clouds?. Disponível em: <[https://www.youtube.com/watch?v=QC2x\\_RRnk8E&t=0s](https://www.youtube.com/watch?v=QC2x_RRnk8E&t=0s)> Acesso em: 12 ago. 2022.

ROBOCORE TECNOLOGIA LTDA., Adicionando Bibliotecas na IDE Arduino.in: RoboCore Tutoriais (2019). Disponível em:<<https://www.robocore.net/tutoriais/adicionando-bibliotecas-na-ide-arduino>>. Acesso em: 10 ago. 2022.

ROSA, Cleci Werner da; ROSA, Álvaro Becker. Ensino de Física: objetivos e implicações no ensino médio, **Revista Electrónica de Enseñanza de las Ciencias** vol. 4 Nº1 (2005). Disponível em:<[http://reec.uvigo.es/volumenes/volumen4/ART2\\_Vol4\\_N1.pdf](http://reec.uvigo.es/volumenes/volumen4/ART2_Vol4_N1.pdf)>. Acesso em: 06 abr. 2022.

SALVADOR, João Pedro Tisatto. Métodos de comunicação Arduino e servidores de aplicação. Disponível em: <<https://micreiros.com/metodos-de-comunicacao-arduino-e-servidores-de-aplicacao/>>. Acesso em: 05 mai. 2022.

SANTOS, Francimar Conceição dos. *et al.* Bobina de tesla musical , in: **V SIINTEC: Simpósio Internacional de Inovação e Tecnologia (2014)**.

TORRES, Willyanm. Como se formam os raios?. Disponível em: <<https://canaltech.com.br/meio-ambiente/como-se-formam-os-raios-205596/>>. Acesso em: 10 ago. 2022.

TIPLER, P., LLEWLLYN, R. A., **Física Moderna** - 3a edição, Rio de Janeiro: LTC, (2001).

TIPLER, Paul Allen, MOSCA, Gene. **Física para Cientistas e Engenheiros - Vol. 2 - Eletricidade e Magnetismo, Ótica - 6<sup>a</sup> edição.** Rio de Janeiro: LTC (2017).

USP. 4.2. Ruptura dielétrica em Gases - Teoria básica, in: Dielétricos Polarização e Ruptura Dielétrica. SEL5713 Dielétricos (2020). Disponível em: <<https://edisciplinas.usp.br/mod/book/view.php?id=2875364>>. Acesso em: 10 ago. 2022 (2020a).

USP. 5. Ruptura dielétrica em Gases – Avalanche de Townsend, in: Dielétricos Polarização e Ruptura Dielétrica SEL5713 Dielétricos (2020). Disponível em <<https://edisciplinas.usp.br/mod/book/view.php?id=2875364&chapterid=23207>>. Acesso em: 10 ago. 2022 (2020b).

WALENDORFF, Marlon Nardi. Projeto – Bobina de Tesla que toca músicas com arduino e Flyback, circuito explicado. Blogger (2014). Disponível em: <<http://professormarlonnardi.blogspot.com/p/bobina-de-tesla-que-toca-musicas-com.html>>. Acesso em: 03 mai. 2022.