



**Abstract:** The main idea of maker culture is that we can build, create and repair objects and spaces with our own hands. In this work we propose to reconstruct the discovery of the electron through the construction of a Crookes tube. The choice of the topic came from the students' interest in high voltage generators during basic electronics classes and studies on the structure of matter. After numerous attempts, a prototype was generated using a high voltage generator with oscillator and automotive coil and a vacuum was produced with a Kitasato flask connected to an air conditioning motor. The experiment showed the effect of electrons moving from the cathode to the anode and then bumping into the wall of the tube, producing luminosity, even if low, but in a satisfactory way, thus reproducing the first experiments to discover the first subatomic particle of the atom, the electron.

**Keywords:** Active methodology. Cathode rays. Do it yourself.

## Introdução

As estratégias pedagógicas mais recentes e inovadoras têm foco no protagonismo dos estudantes e nas chamadas metodologias ativas de aprendizagem. Dentre elas, adaptam-se particularmente bem ao modelo triádico de enriquecimento curricular do Renzulli e Reis (Virgolim, 2007), adotado no programa de Altas Habilidades/ Superdotação (AH/SD) da Secretaria de Estado de Educação do Distrito Federal, a metodologia de aprendizagem baseada em projetos e a cultura *maker*. A aprendizagem por projetos é usada para desenvolvimento das habilidades e interesses dos estudantes como o projeto sobre plantas alimentícias não convencionais e sua aceitabilidade sensorial (Borges et al., 2022). Já a cultura *maker* é empregada em atividades de enriquecimento do tipo III (Rabelo; Bispo, 2021), nas quais os estudantes devem promover atividades investigativas, científicas ou artísticas que levem à construção de um produto como, por exemplo, o baralho de átomos (Coelho et al., 2023).

A principal ideia da cultura *maker* é de que podemos construir, criar e reparar objetos e espaços com nossas próprias mãos e ela faz parte do movimento/cultura faça-você-mesmo ou, em inglês, *Do It Yourself* (DIY). Na sala, ao longo do tempo, os alunos desenvolveram diversos projetos que envolveram estas estratégias, desde HortPANC<sup>1</sup> e robôs seguidores de linha até automação predial com arduino e internet das coisas. No atual projeto, os estudantes foram estimulados a produzirem aparatos

experimentais de observação dos fenômenos físico-químicos com materiais do cotidiano escolar e residencial, entre eles, reconstituir a descoberta do elétron através da construção de um tubo de Crookes. Para melhor compreensão do que se trata o presente trabalho, faremos uma breve revisão cronológica da evolução dos tubos de vácuo até o aparato produzido que levou à descoberta do elétron.

### a) Tubo de Crookes

A invenção dos tubos de vácuo tem sua principal origem no estudo de descarga elétrica nos gases rarefeitos. Segundo Bassalo (1993), as primeiras experiências para obtenção de vácuo foram realizadas por Evangelista Torricelli e Blaise Pascal na primeira metade do século XVII, sendo o primeiro dispositivo a bomba pneumática de Otto Von Guericke, em 1650. Ainda segundo o autor, nos anos sucessivos, Robert Boyle (assistido pelo físico Robert Hooke) aperfeiçoou a bomba de Guericke ao colocar um barômetro na câmara de vácuo e realizou uma série de experimentos, entre eles o célebre estudo da relação entre pressão e volume em transformações isotérmicas.

Dois séculos depois, em 1855, o alemão Heinrich Geissler criou uma bomba sem partes móveis e com ela os tubos de gases rarefeitos – os tubos de Geissler. Em 1858, Julius Plücker, usando os tubos de Geissler, observou que os raios que saíam do cátodo podiam ser desviados em presença de um campo magnético. Em 1876, Eugen Goldstein denominou estas emissões de raios catódicos, mas acreditava que

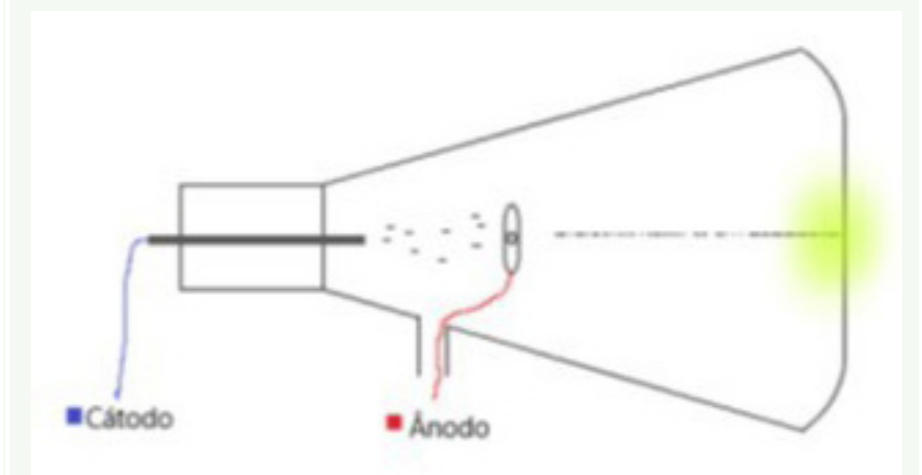
estes raios não passavam de ondas do éter – meio elástico hipotético onde se propaga a luz e que preencheria todos os espaços que não contêm matéria. Nos anos seguintes, William Crookes fazia estudos sistemáticos com esses tipos de raios e geraria os tubos que levam o seu nome, no entanto, ele acreditava que esses raios eram moléculas carregadas de um possível quarto estado da matéria (Crookes, 1878).

O tubo de Crookes (Figura 1), também conhecido como tubo de raios catódicos, consiste em uma ampola de vidro com dois eletrodos de metal, sendo um cátodo negativo em um extremo da ampola e um ânodo positivo posicionado próximo ao cátodo, oposto a ele e com um furo em seu centro. No tubo é criado vácuo e uma grande diferença de potencial é gerada entre os eletrodos. Então, observam-se raios, denominados raios catódicos, os quais partem do cátodo, passam pelo centro do ânodo e são projetados no fundo da ampola, que brilha mais quanto maiores forem as diferenças de potencial e melhores os vácuos produzidos.

### b) Descoberta do elétron

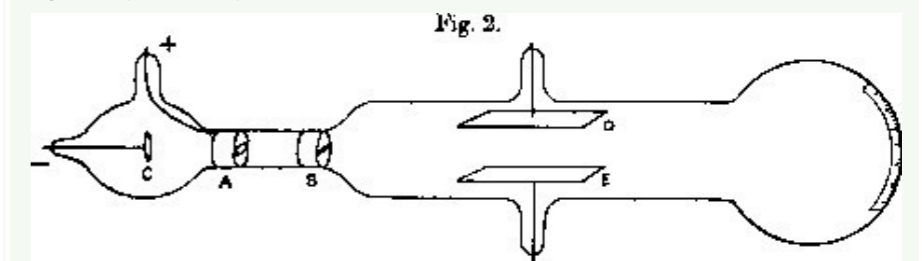
A descoberta do elétron, feita por Joseph John Thomson, derrubou o conceito do átomo indivisível de John Dalton, assim como do Demócrito e Leucipo, que já durava cerca de 2.500 anos e promoveu o estudo da estrutura da matéria que marcaria a trajetória dos grandes cientistas do início do século XX, muitos deles ganhadores de Nobéis, inaugurando também o campo da chamada física de partículas elementares. Segundo Joffily (2005, p. 1), “o elétron, a mais abundante e a mais antiga de todas as partículas elementares” responde por fenômenos físicos tais como a eletricidade, o magnetismo e a criação da luz.

Figura 1 – Tubo de Crookes



Fonte: autores.

Figura 2 – Aparato usado pelo Thomson na descoberta do elétron



Fonte: Thomson (1897).

Segundo Thomson (1897), seus experimentos foram realizados na esperança de obter alguma informação sobre a natureza dos raios catódicos, que eram interpretados de forma quase unânime pelos alemães como perturbações que se propagavam no éter, logo, de forma imprevisível, já que suas leis eram desconhecidas. Para o autor, a teoria das partículas eletrificadas, defendida pelos ingleses, e usada em sua pesquisa, teria uma grande vantagem sobre a teoria etérea, uma vez que suas consequências poderiam ser previstas. Em seu estudo (figura 2), Thomson testou diferentes materiais para os eletrodos como discos de alumínio, ferro, chumbo, estanho, cobre e mercúrio para os cátodos com ânodos de fios de platina, obtendo diferenças de potenciais (ddp) dependentes da natureza do cátodo, mas sempre com a mesma relação  $m/e$ , qualquer que seja o material do eletrodo, onde “ $m$ ” representa a massa de cada uma das partículas e “ $e$ ” a carga transportada por ela.

Ao serem estudados, os raios catódicos apresentaram as seguintes propriedades: surgiam independentemente dos materiais dos eletrodos e no fundo

<sup>1</sup> HortPANC é o Encontro Nacional de Hortaliças Não Convencionais.

do vidro; se projetados contra um anteparo, geravam sombras, logo propagavam-se em linha reta; se projetados em cata-vento, giravam-no, portanto têm massa; a aproximação de um campo elétrico defletia os raios, mostrando que tinham carga negativa; e a aproximação de um campo magnético também defletia os raios, demonstrando que eles eram sensíveis aos campos magnéticos, assim como corpos carregados eletricamente quando em movimento.

Mas, o que são essas partículas? São átomos, ou moléculas, ou matéria num estado de subdivisão ainda mais sutil? Para esclarecer esse ponto, ele faz uma série de medições da razão entre a massa dessas partículas e a carga transportada por elas. E, analisando as propriedades expostas pelos raios catódicos, propõe que os raios eram na realidade um feixe de partículas subatômicas de carga negativa, os elétrons, que originariam seu modelo atômico de “pudim de passas”, que substituiu o modelo anterior, de Dalton. Posteriormente, o físico Robert A. Millikan calculou a carga do elétron com seu experimento da “gota de óleo”. Unindo os trabalhos de Thomson e Millikan, foi possível, então, calcular a massa do elétron. Ambas as pesquisas renderam prêmios Nobel de física a Thomson e Millikan.

E a contribuição de Thomson para o entendimento da estrutura atômica não se limitou à descoberta do elétron. Foram ainda alunos de Thomson, Ernest Rutherford e Niels Bohr, os quais promoveram a elaboração dos dois modelos atômicos sucessores ao de Thomson e que identificaram o tamanho do núcleo atômico e as energias quantizadas das órbitas eletrônicas. Rutherford descobriu o próton e, com o advento da mecânica ondulatória, surgiu o modelo de Erwin Schrödinger que, com os demais citados, formam a base do estudo de estrutura da matéria.

Neste trabalho, desenvolvemos um tubo de Crookes, aparato fundamental para o experimento que derruba a indivisibilidade do átomo, teoria que parmeneceu incontestada desde o século V a.C.

## Metodologia

A sala de recursos específica de altas habilidades/superdotação (SRE- AH/SD) do Centro Educacional Gisno, na área acadêmica de exatas, funciona desde agosto de 2015, e recebe alunos com habilidades acima da média em física, química e matemática.

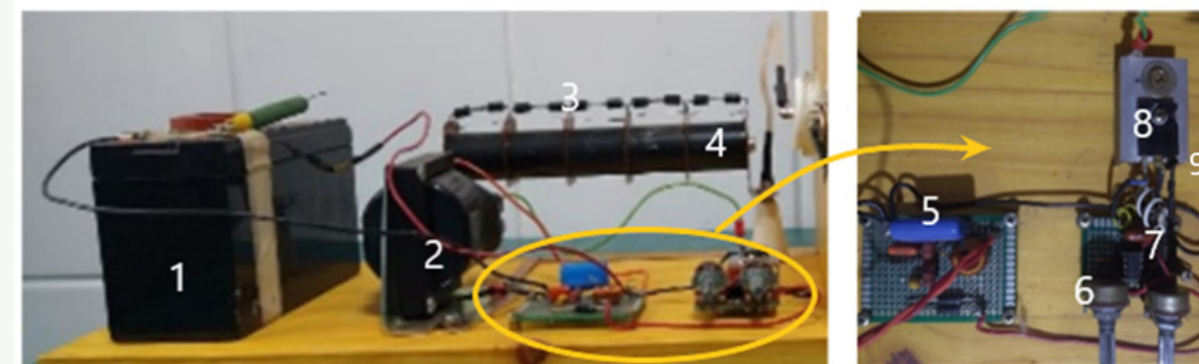
Como na maioria das escolas, nós não dispomos de laboratórios funcionais, principalmente de física, e a partir desta carência, foi proposto ao grupo de estudantes AH/SD e aos estudantes da residência pedagógica em física a construção de experimentos básicos de físico-química com materiais de fácil acesso, manuseio e reprodução a serem usados em uma eletiva de física experimental de acordo com os programas das etapas do Programa de Avaliação Seriada (PAS), uma das formas de ingresso na Universidade de Brasília. A eletiva foi dada no segundo semestre de 2023 e a sequência didática experimental será publicada oportunamente. Após esta experiência, alguns estudantes demonstraram interesse em dar continuidade à proposta e construir experimentos mais sofisticados, sendo o tubo de Crookes o primeiro deles. Para fins de individualização dos trabalhos, o estudante Luiz Eduardo propôs o projeto e ficou responsável pelo estudo de geradores de alta tensão (seu maior foco), Paulo Victor pelo estudo das válvulas e da descoberta do elétron enquanto que o estudante Antônio Caminha ficou encarregado da montagem do protótipo e obtenção de um bom vácuo, todos sob supervisão teórica e prática de seus orientadores. Após a montagem, modificações foram sendo feitas pelo grupo a partir dos problemas apresentados e da base adquirida na construção do aparato.

Para a produção do fenômeno de aceleração do elétron a partir de um cátodo até o ânodo, é necessária a aplicação de alta tensão em corrente contínua, logo, perseguiu-se a construção de um gerador de alta tensão (conforme Figura 3). A base teórica para tal experimentação foi construída principalmente nas aulas de eletrônica básica, ministradas remotamente no período pandêmico por um dos autores, e nos livros de Braga (2013) e de circuitos elétricos do Boylestad e Nashelsky (2004).

### a) Gerador de alta tensão com oscilador e bobina automotiva

As primeiras tentativas empregaram um oscilador construído a partir do circuito integrado 555 (CI 555), um multivibrador astável que oscila continuamente entre dois estados (ligado e desligado), gerando um sinal de onda quadrada ou pulsos em sua saída. A alimentação do conjunto é feita por uma bateria de 12 volts. O pulso obtido, na frequência de 400 Hz, foi utilizado para chavear um transistor tip3055, por saturação de corrente de base do transistor. A função de

Figura 3 – Gerador de alta tensão



- |                      |               |                   |                       |          |
|----------------------|---------------|-------------------|-----------------------|----------|
| 1- bateria de 12 V   | 3- diodos     | 5- capacitor      | 7- CI 555             | 9- zener |
| 2- bobina automotiva | 4- resistores | 6- potenciômetros | 8- Transistor tip3055 |          |

Fonte: autores.

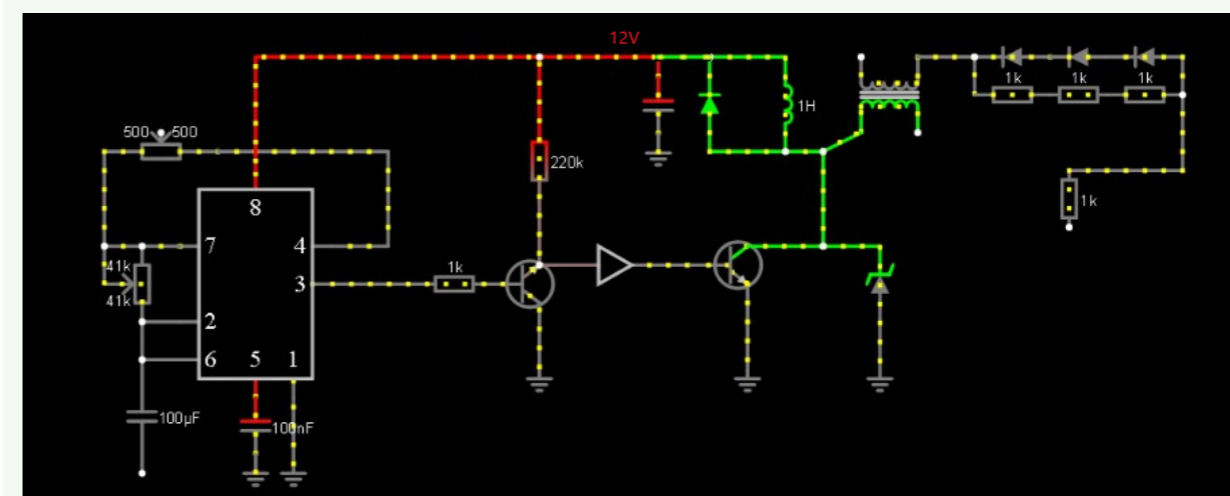
chave do transistor foi desempenhada pela condução de corrente (ou não) entre seu coletor e emissor. Uma tensão de 12 volts é utilizada para alimentar a bobina automotiva em série com o transistor, o primário da bobina automotiva é chaveado pelo transistor comandado pelos pulsos do oscilador. Como consequência, a corrente que passa intermitentemente no primário da bobina, induz uma tensão no secundário da mesma, da ordem de 5 kV (conforme a Figura 3). Em outras palavras, a bobina de ignição de carro funciona como um transformador. Ela tem um enrolamento primário e um secundário, que são interconectados, permitindo a indução de alta tensão no secundário a partir de uma tensão relativamente baixa no primário. A tensão, ainda na forma de corrente alternada, é então retificada por um conjunto de diodos em série,

obtendo-se tensão negativa de 5 kV, a qual é aplicada ao eletrodo de cátodo do tubo de raios catódicos (conforme Figura 4). Nesse momento, a diferença de tensão entre o ânodo positivo e o cátodo negativo cria a aceleração do elétron que sai do cátodo e vai para o ânodo, atravessando o orifício e as bordas do ânodo e chegando até o vidro do tubo de Crookes.

### b) Tubo de vácuo

Para a construção de um tubo de Crookes (Figura 5), foi empregado um frasco do tipo kitassato, uma rolha de teflon construída empregando torno mecânico, com a finalidade de vedar o pescoço do tubo e dar passagem ao eletrodo de cátodo. A mesma peça serve de

Figura 4 – Esquema do circuito elétrico



Fonte: autores.

fixação para um pedaço de pipeta de vidro que desempenha o papel de suporte para o eletrodo de ânodo. Para evitar a fuga de elétrons e a possibilidade de choques, foi feito um aterramento com uma barra de cobre, que desvia a corrente elétrica para o solo em caso de falhas elétricas, evitando assim danos às pessoas e aos equipamentos. A conexão do ânodo à terra, que no caso deste experimento é positiva, bem como a exaustão do ar para gerar o vácuo, são feitos pelo orifício de vácuo do kitassato. Como bomba de vácuo, foi empregado um motor de ar-condicionado.

## Resultados e discussão

Os resultados obtidos se dividem em dois grupos:

### a) Resultados de alta tensão

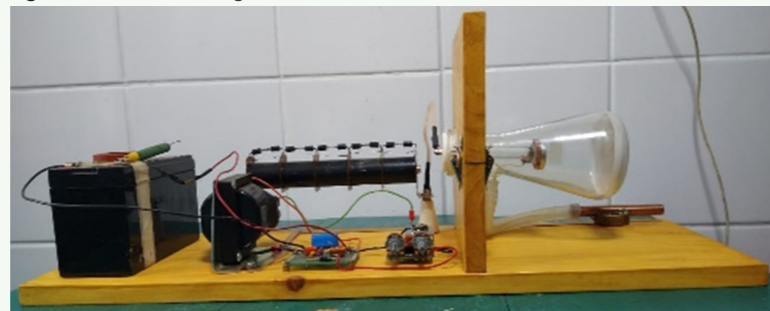
Os resultados obtidos foram difíceis em relação ao gerador de alta tensão, pois os transientes de chaveamento da bobina danificaram o CI 555 e o transistor. Foi necessário construir uma versão mais robusta empregando um transistor chaveador tip3055. Também foi necessário construir um circuito de filtro de transiente empregando diodos zener, para limitar a tensão de alimentação do CI 555 em 9 Volts, com isso o circuito oscilador pode trabalhar de forma estável. Na Figura 3, toda a placa que envolve o capacitor (identificado pelo nº 5) é o circuito de filtro anti-transiente.

Sobre a importância desta fase do projeto, cabe ressaltar que é a alta tensão entre o cátodo e o ânodo do tubo que acelera os elétrons formando os raios catódicos e que, quanto maior a energia cinética, mais fácil é detectar a cor e intensidade da fluorescência de certos materiais dentro do tubo, já que uns brilham quando atingidos pelos elétrons de alta energia, além da velocidade afetar a magnitude do desvio do feixe diante de um campo elétrico e magnético.

### b) Resultados no tubo de vácuo

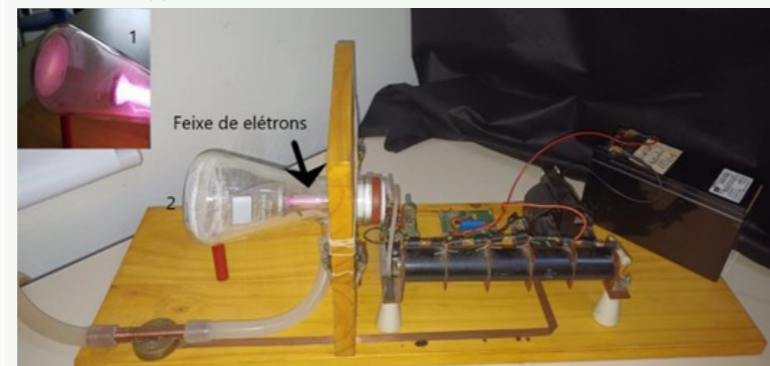
Outro desafio foi obter um vácuo duradouro no kitassato: a vedação insuficiente da rolha de teflon

Figura 5 – Tubo de Crookes gerado



Fonte: autores.

Figura 6 – Feixe de elétrons formado em diferentes condições de luminosidade: (1) baixa luminosidade e (2) tubo à luz do dia



Fonte: autores.

teve de ser melhorada, pois se perdia o vácuo em três minutos. Com nova vedação e vácuo mais duradouro e mais intenso, foi possível verificar um arco voltaico cátodo e ânodo, formação de sombras e de um ponto luminoso na parede do tubo (conforme Figura 6). O emprego de motor de ar-condicionado não produz um vácuo intenso como desejado, sendo desejável o emprego de uma bomba de vácuo de uso profissional nas próximas versões.

No tubo de Crookes, foram produzidos os raios catódicos, nos quais os elétrons saem do cátodo para o ânodo, colidem com as moléculas do gás provocando sua ionização e liberando luz violeta – observa-se um brilho rosa enchendo o tubo (conforme Figura 6)<sup>2</sup>. Comparando as imagens entre os kitassatos 1 e 2, é possível observar que, após algum tempo de funcionamento do dispositivo, as partículas de pó fosforescente que estavam depositadas no fundo do kitassato foram arrastadas para as laterais formando um anel branco, provando que o feixe de elétrons gera movimento. Por fim, para testar o comportamento dos raios diante de um campo magnético, foi usado um ímã de neodímio obtido do desmonte de um velho HD e foi observado um pequeno desvio do feixe. A deflexão dos raios

catódicos depende da qualidade do vácuo, segundo Thomson (1897) e em nosso aparato, o controle da qualidade do vácuo ainda merece aprimoramento.

## Considerações finais

O entendimento humano do átomo foi moldado ao longo dos últimos séculos por meio de diversos experimentos, os quais revelaram diferentes características e propriedades da estrutura atômica e de seus componentes. Entre eles, há destaque especial para o elétron, a subpartícula que protagoniza todas as reações químicas, descoberta pelo físico britânico J. J. Thomson em 1897, utilizando um tubo de Crookes. Na época, fenômenos elétricos e magnéticos já eram conhecidos e haviam sido extensamente estudados. Porém, a descrição da composição da matéria existente ainda não era compatível com eles.

Com o estudo de descargas em gases rarefeitos e a construção do tubo de Crookes, foi possível observar o feixe de elétrons se deslocando do cátodo ao ânodo e deste esbarrando na parede do tubo, produzindo luminosidade de forma satisfatória, reproduzindo, assim, os primeiros experimentos da descoberta do elétron, a primeira partícula subatômica e a mais antiga partícula elementar. Em experimentos futuros, buscaremos melhorar o gerador de alta tensão de 5kV para 25kV, por meio do uso de um transformador de saída de linha, o flyback, e produzir um vácuo melhor. Como perspectiva, temos a ampliação da experiência adquirida com este experimento para produzir um possível mini acelerador de partículas.

Por fim, os objetivos propostos foram alcançados. Para além da criação do tubo e do trabalho com geradores de alta tensão, de iniciativa deles e de construção deles, houve uma combinação de aspectos teóricos e práticos, muito desejada nos projetos da sala. 😊

## Referências

- BASSALO, José Maria Filardo. A Crônica da Física do Estado Sólido: I - Do Tubo de Geissler às Válvulas a Vácuo. **Revista Brasileira de Física**, v. 15, nº (1-4), 1993, p. 127-138.
- BORGES, Felipe Rocha; SANTOS, Júlia Barbosa Lemos dos; NAKAMURA, Estela Baron; TOMINGA, Pedro Paulo; MACIEL, Glauciete Sarmiento. Teste de aceitação sensorial da Coromandel (*Asystasia gangetica*). **Revista Com Censo Jovem: Iniciação Científica de**

Estudantes da Educação Básica, Brasília, v. 1, n. 1, p. 32-37, 30 jun. 2022.

BOYLESTAD, Robert L.; NASHELSKY, Louis. **Dispositivos eletrônicos e teoria de circuitos**. 8ª edição, Pearson: Printice-Hall, 2004.

BRAGA, Newton Carvalho. **Curso de Eletrônica Básica**, v. 1, SABER, 2013.

COELHO, Hugo Hallwass; SPUR, Theo Roland; SILVA, Antônio Caminha Goetz da; CORADO, Breno Lúcio Brandão; VASCONCELLOS, Emmanuel Rodrigues Fortaleza; MACIEL, Glauciete Sarmiento. Baralho dos átomos: aprendizagem gamificada no estudo de química. **Revista Com Censo Jovem: Iniciação Científica de Estudantes da Educação Básica**, Brasília, v. 2, n. 1, p. 44-53, 30 jun. 2023.

CROOKES, William. On the illumination of lines of molecular pressure, and the trajectory of molecules. **Philosophical Transactions**, v. 170, p. 135-164, 1878. DOI: 10.1098/rstl.1879.0065.

JOFFILY, Sérgio. **A descoberta do elétron**. Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas. Instituto de Cosmologia, Relatividade e Astrofísica (ICRA-BR). Disponível em: [https://cbpfindex.cbpf.br/publication\\_pdfs/mo00205.2011\\_01\\_18\\_10\\_18\\_58.pdf](https://cbpfindex.cbpf.br/publication_pdfs/mo00205.2011_01_18_10_18_58.pdf). Acesso em: 16 out. 2023.

RABELO, Rachel Souza; BISPO, Lucy Mary da Rocha. Indicação, acolhimento e identificação do estudante com Altas Habilidades/Superdotação em Sobradinho-DF. **Revista Sala de Recursos**, 2021, p. 64-72.

THOMSON, Joseph John. Cathode Rays. **Philosophical Magazine**, v. 44, 1897, p. 293-316.

VIRGOLIM, Ângela Magda Rodrigues. **Altas habilidades/superdotação: encorajando potenciais**. Ministério da Educação, Secretaria de Educação Especial, 2007. Disponível em: <http://portal.mec.gov.br/seesp/arquivos/pdf/altashab1.pdf>. Acesso em: 10 jul. 2023.

## Apêndice

Para assistir ao vídeo que demonstra o funcionamento do tubo de Crookes desenvolvido nesse artigo, acesse:



<sup>2</sup> Para ver o funcionamento do tubo de Crookes gerado durante esse projeto, acesse o QR Code disponível no apêndice desse artigo.