



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO
Instituto de Física
Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física
Mestrado Profissional em Ensino de Física

**ENSINO DA LEI DE FARADAY NO ENSINO MÉDIO COM USO DE UM
CAPTADOR DE GUITARRA**
(Material do professor)

Daniel Moreira Avila

Hugo Milward Riani de Luna

Material institucional associado a
dissertação de mestrado de Daniel Moreira
Avila, apresentada ao Programa de Pós-
Graduação em Ensino de Física da
Universidade Federal do Rio de Janeiro.

Rio de Janeiro
2023

SUMÁRIO

Capítulo 1	3
Capítulo 2	4
Capítulo 3	6
Capítulo 4	9
Capítulo 5	13

Capítulo 1

Introdução

A indução eletromagnética é um conceito fundamental na física e tem diversas aplicações práticas em dispositivos e tecnologias do cotidiano, desde a geração de energia elétrica em usinas até carregadores de celulares sem fio. No entanto, o ensino desse tema pode apresentar desafios, uma vez que os mecanismos e conceitos envolvidos nem sempre são facilmente evidentes no dia a dia dos alunos. De fato, é intuitivo imaginar que podemos acender a lâmpada de uma lanterna com uma pilha (conjunto de pilhas). Por outro lado, foge ao senso comum da maioria dos estudantes, que o mesmo resultado pode ser obtido fazendo-se variar o fluxo do campo magnético de um ímã. O próprio conceito de variação de fluxo de um campo vetorial, não é intuitivo e requer uma capacidade de abstração matemática que somente figuras esquemáticas no quadro negro, não são suficientes para o aluno.

O uso de novas tecnologias, como por exemplo o uso dos sensores dos aparelhos celulares, facilita a inclusão de diferentes abordagens pedagógicas permitindo o aluno questionar e construir seu conhecimento a partir da observação e da experimentação. A contextualização também é um aspecto importante no ensino de física e, muitas vezes, pode ser desafiador encontrar exemplos que sejam ao mesmo tempo cotidianos e interessantes.

A história da guitarra elétrica oferece uma excelente oportunidade para abordar temas de física (i.e., indução eletromagnética), pois é um instrumento que está presente em diversos gêneros musicais e é de interesse dos jovens, mesmo dos que não tocam guitarra. Em 1931, Adolph Rickenbacker, fundou a Rickenbacker International Corporation. Logo depois, ele e seu parceiro, George Beauchamp, patentearam uma guitarra chamada "*Frying Pan*". Essa guitarra foi a primeira a ser produzida em massa eletromagneticamente amplificada, marcando o início da guitarra elétrica moderna (CASTRO, 2007).

Na década de 1940, a Gibson e a Fender entraram em cena e contribuíram significativamente para o desenvolvimento da guitarra elétrica. A Gibson lançou a lendária guitarra "*Les Paul*" em 1952, projetada em colaboração com o guitarrista Les Paul. Enquanto isso, Leo Fender fundou a Fender Electric

Instrument Manufacturing Company e lançou a guitarra "*Telecaster*" em 1950 e a icônica "*Stratocaster*" em 1954.

Um dos elementos fundamentais da guitarra elétrica é o captador elétrico, a utilização deste elemento pode ser utilizada para abordar a Lei de Faraday de forma lúdica e qualitativa, relacionando-a com um elemento próximo da realidade dos alunos.

A proposta deste trabalho é descrever uma alternativa para abordar a lei de indução de Faraday usando um kit experimental composto por um captador de guitarra elétrica, um motor elétrico, controlador de velocidade, uma placa Arduino, um sensor de luz do tipo LDR e ímãs. Esse kit pode ser utilizado como um apoio ao professor na elaboração de atividades que permitam aos alunos compreenderem a relação entre a variação do fluxo do campo magnético e a força eletromotriz induzida (fem).

Podemos encontrar na literatura diversos trabalhos relacionados ao ensino da lei de Faraday no ensino médio, os quais destacamos os trabalhos de (LIMA, 2020) e (REIS, 2018). No entanto, utilizando o captador da guitarra elétrica, não encontramos nenhuma proposta que se encaixasse em uma abordagem para o ensino médio.

Capítulo 2

Funcionamento do captador magnético

Os captadores são conhecidos como "o coração" da guitarra, tal analogia decorre do fato de ele ser essencial para que a guitarra produza seu som. Eles são produzidos a partir de um fio de cobre esmaltado enrolado na forma de bobina (2) ao redor de ímãs (magnetos) (1), conforme exemplo da Figura 1. Esse enrolamento é constituído por centenas (até milhares) de voltas. Envoltos em uma capa (3), o captador é colocado abaixo das cordas para captar suas vibrações (ZACZESK et al., 2018).

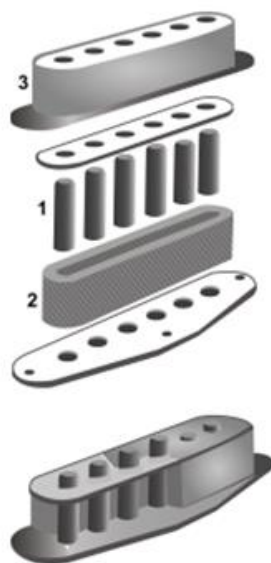


Figura 1. *Captador magnético single coil*
Fonte: Zaczek et al. (2018).

As cordas da guitarra são posicionadas acima de cada magneto, elas são compostas por material ferromagnético, de maneira que na presença do campo magnético dos ímãs permanentes (item 1 da figura 1), passam a ser imantadas e a se comportar como ímãs. Ao vibrarem causam variação no fluxo do campo magnético, que atravessa a bobina induzindo a produção de uma fem que posteriormente é traduzida em som. Por isso, a utilização de cordas de nylon como em violões acústicos é inviável, uma vez que esse material não pode ser imantado (WERNECK, 2007; ZACZESK et al., 2018).

Os captadores são ligados a potenciômetros que controlam o volume e o tom da guitarra. A seleção dos captadores ligados é feita por uma chave, esse sinal é transmitido para a saída da guitarra que é conectada a um equipamento externo, como uma mesa de som ou uma caixa amplificadora, onde o som é finalmente produzido (LAGO, 2015).

Dentre os tipos existentes, (SILVA, 2016) menciona as seguintes configurações; A *single coil* (bobina única), *humbucker* (duas bobinas), *mini humbucker* (as bobinas são passivas e de dimensões compactas), *stacks* (que possui duas bobinas sobrepostas, sendo uma ativa e outra passiva), *dual coil* (possui duas bobinas e produz maior uniformidade do campo magnético por toda sua extensão), *tri-bucker* (associação entre três bobinas, um *humbucker* e um

single-coil) e sistema *quad-rail* (quatro bobinas alinhadas em pares). Cada captador produz um tipo de som diferente, então sua aplicabilidade pode variar de acordo com o estilo musical.

O captador *single-coil* ficou conhecido pelo seu uso na guitarra Fender Stratocaster. Pode ser constituído por um ímã em barra ou por seis ímãs (um para cada corda). Produz um som limpo e intenso, sendo amplamente utilizado em diversos estilos devido a sua versatilidade. Ao contrário do *single-coil*, o *humbucker* produz um som mais “cheio” e “pesado”. Este captador é utilizado principalmente no Jazz e no Heavy Metal. Ele é formado por dois *singles coils*, que podem ser colocados lado a lado ou sobrepostos (coaxial), com polaridades opostas. Isto faz com que o ruído de fundo produzido por um deles seja anulado pelo outro. Este modelo foi produzido pela Gibson e ganhou notoriedade pelo mundo.

Capítulo 3

Montagem do projeto experimental

Como explicado anteriormente, para induzir uma fem no captador da guitarra, uma variação do fluxo do campo magnético deve ocorrer a partir da vibração da corda (de material ferromagnético). Estes sinais, são tênues e necessitam de filtros e amplificação. Para contornar essa situação e evitar o uso de mais componentes elétricos substituímos a corda por um conjunto de ímãs permanentes. A variação do fluxo do campo magnético pode ser obtida a partir da variação da posição destes ímãs, como esquematizado na Figura 2.

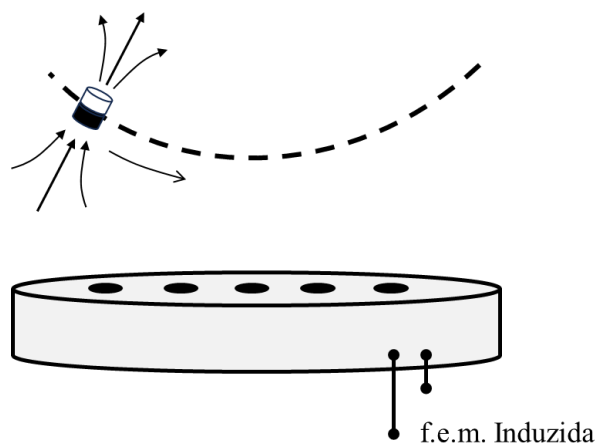


Figura 2. Desenho esquemático para obter um sinal do captador eletromagnético a partir de um ímã em substituição a corda da guitarra
 Fonte: autor (2023).

Essa variação, pode ser feita de diversas formas e fica a critério do professor. Neste trabalho, nós iremos utilizar uma geometria que possibilita medir a fem induzida em função da taxa de variação do fluxo do campo magnético. A variação é feita de forma periódica em conjunto de ímãs são presos nas pontas de duas hélices perpendiculares entre si. O centro das hélices está acoplado a um motor DC cuja velocidade de rotação pode variar de forma controlada até próximo ao valor máximo de 12400 rpm sem carga (~200 Hz).

O material necessário para construção do projeto pode ser encontrado em lojas de eletrônica, de material de construção e papelaria ou comprados pela internet. O orçamento estimado para cada item é detalhado na Tabela 1, a seguir.

Item	Orçamento
Captador <i>single coil</i>	R\$40 a R\$120 (novo)
Placas MDF 3mm	R\$ 10 a 20
Arduino Uno	R\$ 100
Bornes (preto e vermelho) para conexão com pino banana	R\$2 a R\$4 (cada)
Pontas de prova	R\$15 a R\$25
Abraçadeira	R\$6 a R\$10
Cano PVC (7cm)	R\$20 a R\$40
Motor DC 12V máx. 12.400 RPM	R\$30 e R\$60
Palitos de sorvete	R\$4 a R\$8 (pacote)
Massa epóxi	R\$5 a R\$7
Ímãs de neodímio	R\$4 a R\$7
Minimódulo controlador de velocidade DC PWM 5V-35V e 5A	R\$20 a R\$40
Fonte para notebook 12V-24V 4,5A	R\$30 a R\$50
Total aproximadamente entre	R\$250 e 500

Tabela 1. Estimativa de orçamento
 Fonte: autor (2023).

Na Figura 3 temos uma foto do kit montado, onde o captador está fixado no centro da face superior de uma placa MDF, 2 bornes para mediação do sinal da fem induzida utilizando um multímetro e o sistema para suporte imãs e motor.

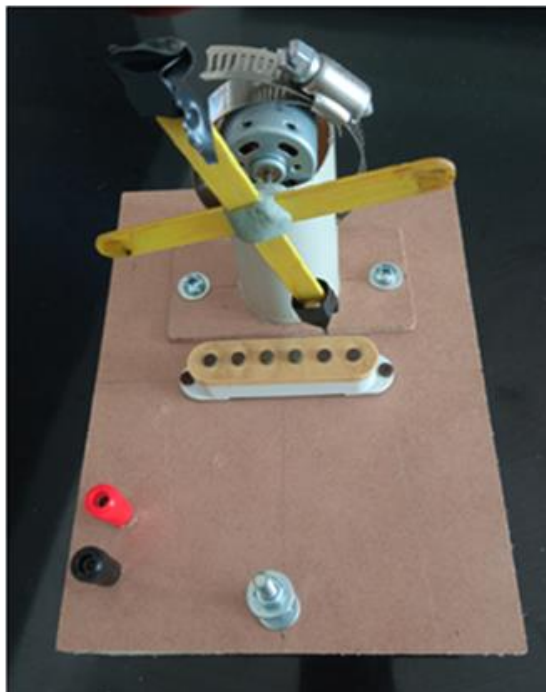


Figura 3. Foto do sistema montado: captador, motor e hélices com imãs presos as extremidades
Fonte: autor (2023).

Para alimentar o motor, usamos uma fonte genérica de notebook com chave seletora de tensão de saída (12V-24V) e corrente contínua máxima de 4,5 A. O controle de rotação foi feito com um minimódulo controlador de velocidade DC PWM com tensão de funcionamento na faixa de 5V a 35V e corrente máxima de 5A, assim é possível relacionar de forma qualitativa a frequência de rotação com a fem induzida.

Toda a montagem foi apresentada em vídeos que foram subidos o site *youtube* para demonstrar a utilização do kit. Os vídeos podem ser encontrados no canal “@dissertacaodanielavila” ou nos endereços a seguir com a seguinte divisão:

Vídeo 1: Demonstração de itens do kit

https://www.youtube.com/watch?v=eo3S07es8hE&ab_channel=DanielAvila

Vídeo 2: Conexões do captador de guitarra e motor

https://www.youtube.com/watch?v=-IK8xUHAtJU&ab_channel=DanielAvila

Vídeo 3: Conectando o motor e medindo a fem induzida

https://www.youtube.com/watch?v=j_3IG1wxSFs&ab_channel=DanielAvila

Vídeo 4: Medindo a corrente de entrada no motor

https://www.youtube.com/watch?v=fWCh0Q7XdN8&ab_channel=DanielAvila

Capítulo 4

Análise

Para relacionar a força eletromotriz induzida com a taxa de variação do fluxo do campo magnético, é necessário medir a frequência de rotação do motor. Essa medição pode ser realizada observando a saída da fem induzida no sensor diretamente em um osciloscópio, a partir do qual é possível determinar a sua amplitude e a frequência. No entanto, o osciloscópio é um instrumento de medição de alto custo, tornando-o pouco acessível para a maioria das escolas brasileiras. Além disso, a operação deste instrumento poderia representar um nível de dificuldade adicional para os alunos, além de muitos professores não estarem familiarizados com sua utilização. Esta barreira por si só já seria um desencorajador para o docente ao considerar a proposta experimental deste trabalho.

Desta forma, contornamos essa dificuldade utilizando a ferramenta Arduino, que além de ser barata, está cada dia mais presente no ensino de física e áreas afins. A frequência de rotação pode ser obtida em função da medida da corrente de alimentação do motor. Essa “calibração” consiste em posicionar um sensor de luz, por exemplo, um sensor de luz do tipo LDR na parte traseira do motor, enquanto este é iluminado por uma fonte de luz. Quando a hélice se alinhar ao sensor, uma sombra é projetada, fazendo com que a leitura da saída seja alterada. Com o uso dessa montagem é possível inferir o período da passagem das hélices e assim obter a frequência de rotação do motor concomitante a medida do V_{rms} da fem induzida no multímetro.

Para medição dos valores da corrente de entrada no motor foi montado um circuito como o observado no esquema da Figura 4.

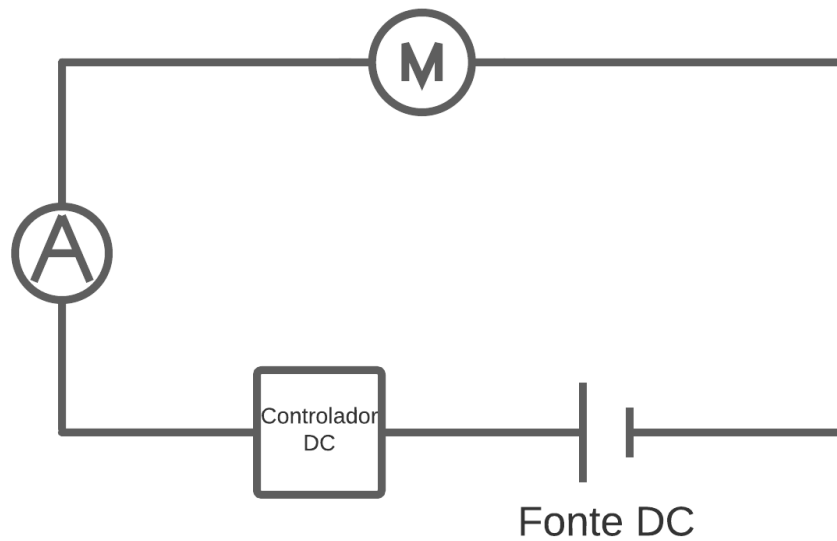


Figura 4. Esquema de montagem para medição da corrente do motor
Fonte: arquivo pessoal (2023).

Também foi montado um esquema para medição da fem induzida no captador da guitarra que pode ser observada no esquema da Figura 5.

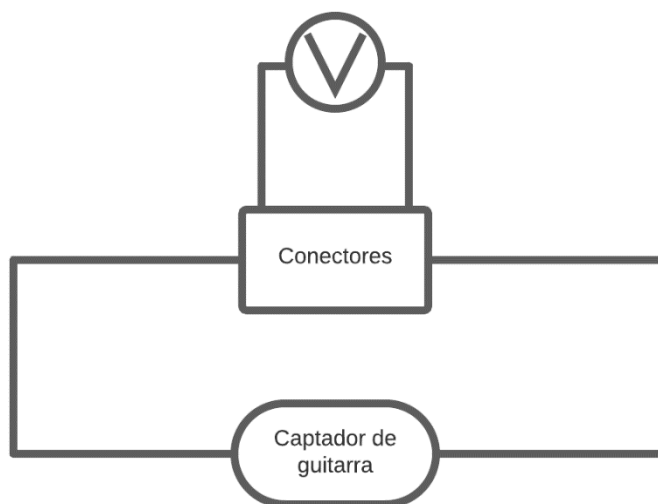


Figura 5. Esquema de montagem para medição da fem induzida no captador
Fonte: arquivo pessoal (2023).

Na Figura 6 temos um exemplo da aquisição da leitura da saída do LDR via Arduino, para as correntes de alimentação do motor de 110 e 630 mA. O período é obtido pela diferença do número de leituras para um hélice voltar a

fazer sombra (5 sombras) multiplicada diferença de tempo entre leituras obtida pela função *millis(...)* do Arduino. O tempo obtido foi de aproximadamente 3ms. Como o escopo deste trabalho não é o de obter com precisão a frequência de rotação do motor assumimos que o período é dado por: $T_n = n \text{ leituras} \times 3ms$.

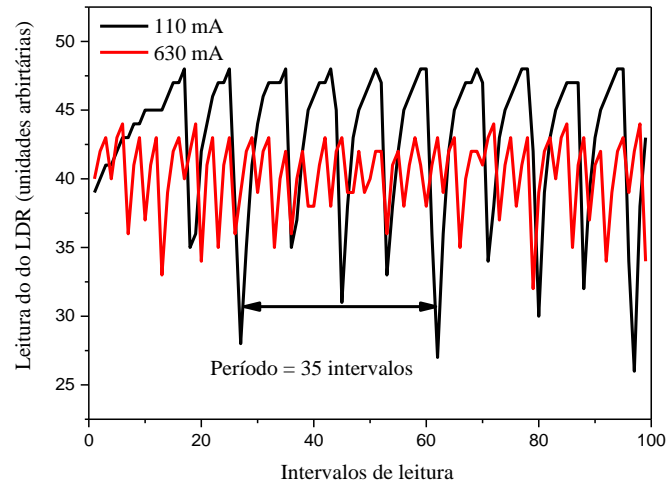


Figura 6. Aquisição dos valores do LDR utilizando Arduino
Fonte: autor (2023).

Os valores medidos simultaneamente de rms da corrente (multímetro), frequência de rotação do motor (Arduino) e rms da fem induzida no captador (multímetro) podem ser visualizados na Tabela 2, a seguir.

Corrente (mA)	Frequência	fem (mV)
110±1%	9,5	654±5%
170	12,8	920
220	15,1	1105
290	17,1	1252
360	19,0	1371
430	20,8	1466
510	22,2	1565
570	23,8	1650
630	25,6	1719

Tabela 2. Valores medidos para corrente, frequência e fem
Fonte: autor (2023).

Para a incerteza da medida da corrente, assumimos o valor fornecido pelo fabricante do multímetro na escala de mA. Para a fem usamos a variação média (aproximada) observada nas leituras do multímetro.

A relação entre a corrente e a frequência de rotação do motor pode ser observada e é possível elaborar uma sequência didática com os alunos utilizando apenas multímetros para medir a corrente de alimentação do motor e a fem induzida, caso o professor não possa levar a sala de aula o módulo Arduino. A partir de uma tabela ou função de calibração o aluno poderá inferir qual seria a taxa de rotação do motor indiretamente a partir da medida da corrente de alimentação.

Neste estágio da sequência didática, é crucial que o aluno perceba que a frequência de rotação está ligada a taxa de variação do fluxo do campo magnético na face do captador. Essa relação é ilustrada na Figura 7 e caracteriza qualitativamente de forma experimental a Lei de indução de Faraday.

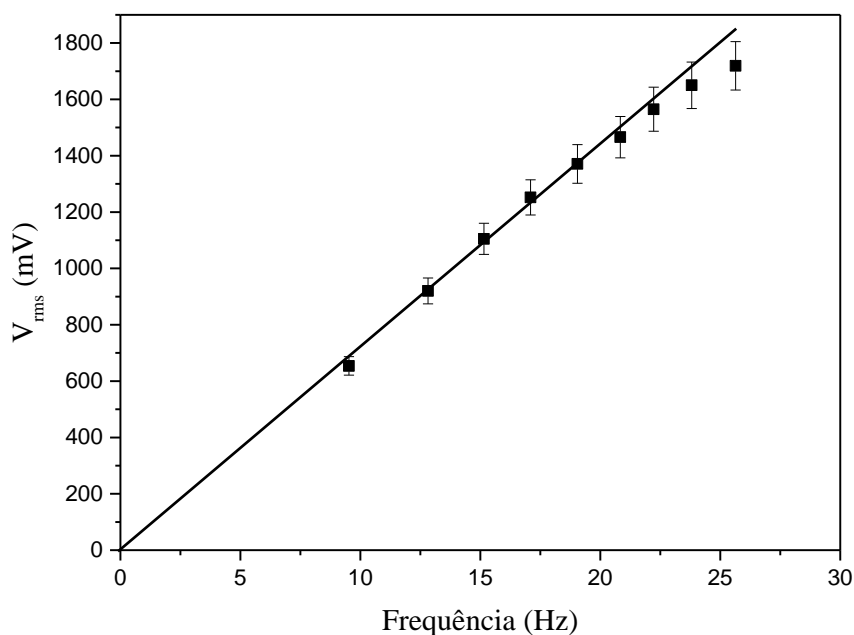


Figura 7. Frequência vs. fem. induzida no captador
Fonte: autor (2023).

Interessante observar que existe uma região onde a fem induzida e a taxa de variação do fluxo do campo magnético se relacionam de forma linear (frequência de rotação). Neste momento o professor pode fechar sequência didática introduzindo um exemplo teórico, como o de uma espira que gira em

torno de seu eixo em uma região de campo magnético uniforme e mostrar que neste caso ideal, espera-se que a fem induzida seja diretamente proporcional a frequência de rotação da espira, tal qual ocorre em uma faixa de rotação do projeto construído em sala de aula.

Outro ponto que deve ser levado em consideração é que a frequência medida no motor não corresponde a medida a partir da Lei de indução eletromagnética, uma vez que há dois ímãs colocados diametralmente opostos.

Capítulo 5

Comentários finais

Podemos destacar algumas vantagens na utilização do captador de guitarra em uma atividade experimental para demonstrar a lei de indução de Faraday voltada para o ensino médio:

- Facilidade de Montagem. Em particular, a fem induzida no captador é suficientemente grande para ser medida utilizando um multímetro.
- Baixo custo.
- Aprendizado ativo: Os alunos têm a oportunidade de serem protagonistas do próprio aprendizado, coletando dados e analisando resultados em sala de aula.
- Contextualização. A importância da lei de indução, a partir do entendimento de como funciona o primeiro passo (elétrico) na tradução da vibração mecânica em som. A partir daí o professor pode explorar a interdisciplinaridade da física com outras áreas, como a música e a engenharia. Eles podem investigar posteriormente como o projeto dos captadores influencia o timbre e o som da guitarra, bem como o papel da eletricidade e do magnetismo na amplificação do som.

Referências bibliográficas

[Castro, 2007] Castro, G. A. S. Guitarra elétrica: entre o instrumento e a interface. 2007. Disponível em https://www.anppom.org.br/anais/anaiscongresso_anppom_2007/sonologia/sonolog_GASCastro.pdf

[Lago, 2015] Lago, B. L. A guitarra como um instrumento para o ensino de física ondulatória. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 37, n. 1, p. 1504, 2015. DOI:<http://dx.doi.org/10.1590/S1806-11173711663>

[Lima, 2020] Lima, D. S. Ensino da Física por investigação: uma proposta para o ensino da Ley de Faraday. (Dissertação de Mestrado) – Universidade Federal do Pará, 2020, 81 p.

[Reis, 2018]. Reis, T. O. Estudo experimental da Lei de Faraday da indução eletromagnética utilizando um smartphone e um computador. (Dissertação de Mestrado) – Universidade Federal de São Carlos, 2018, 85 p.

[Silva, 2016] Silva, V. N. L. Desenvolvimento tecnológico: a propriedade industrial na produção da guitarra elétrica e captadores no Brasil. (Dissertação de mestrado) – Universidade Federal de Sergipe. São Cristóvão, 2016, 83 p.

[Werneck, 2007] Werneck, N. L. Análise da distorção musical de guitarras elétricas. (Dissertação de mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação. Campinas 2007, 109 p.

[Zaczesk, 2018] Zaczesk, M. E., Beckert, C. H., Barros, T. G., Ferreira, A. L. e Freitas, T. C. Violão: aspectos acústicos, estruturais e históricos. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 40, n. 1, e1309, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1590/1806-9126-RBEF-2017-0192>