

Explicação qualitativa do “*anel de Thomson*”. Como ocorre a “levitação magnética”?

A qualitative explanation for “Thomson’s ring” experiment. How does the “magnetic levitation” happen?

REVISTA BRASILEIRA DE ENSINO DE FÍSICA, VOL. 25:1, N. 81-85, 2003.

Fernando Lang da Silveira

Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS

Instituto de Física

Caixa Postal 15051 – 91501-970 – Porto Alegre, RS – Brasil

Endereço eletrônico: lang@if.ufrgs.br

Rolando Axt

Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul – UNIJUÍ

Departamento de Física, Estatística e Matemática

Caixa Postal 560 – 98700-000 – Ijuí, RS – Brasil

Resumo. A “levitação magnética” de um anel condutor (“*anel de Thomson*” ou “*anel saltante*”) é uma demonstração bem conhecida; mais fácil de realizar do que de explicar. No presente trabalho propomos uma explicação qualitativa com o objetivo de esclarecer alguns aspectos obscuros das explicações comumente encontradas na literatura.

Abstract. The “magnetic levitation” of a conducting ring (“*Thomson’s ring*” or “*jumping ring*” experiment) is a well-known demonstration, easier to perform than to explain. In this paper we propose a qualitative way to explain it, to clarify some obscure aspects of explanations found in literature.

I – Introdução

Uma fascinante demonstração sobre eletromagnetismo é a “levitação magnética” de uma argola de alumínio. Conforme mostra a figura 1a, a argola é posicionada ao redor de um longo núcleo de ferro-doce, instalado em uma bobina que é alimentada com tensão alternada¹. Essa demonstração é conhecida como “*anel saltante*” ou “*anel de Thomson*”, em homenagem ao físico norte-americano Elihu Thomson, que a inventou no século XIX.

¹ – O dispositivo mostrado nessa figura é uma espécie de transformador, com 500 espiras na bobina primária, alimentada em 127 V e 60 Hz. O secundário consiste em uma ou duas argolas de alumínio que levitam em função de correntes elétricas induzidas nessas argolas. O núcleo de ferro foi montado empilhando três núcleos convencionais.

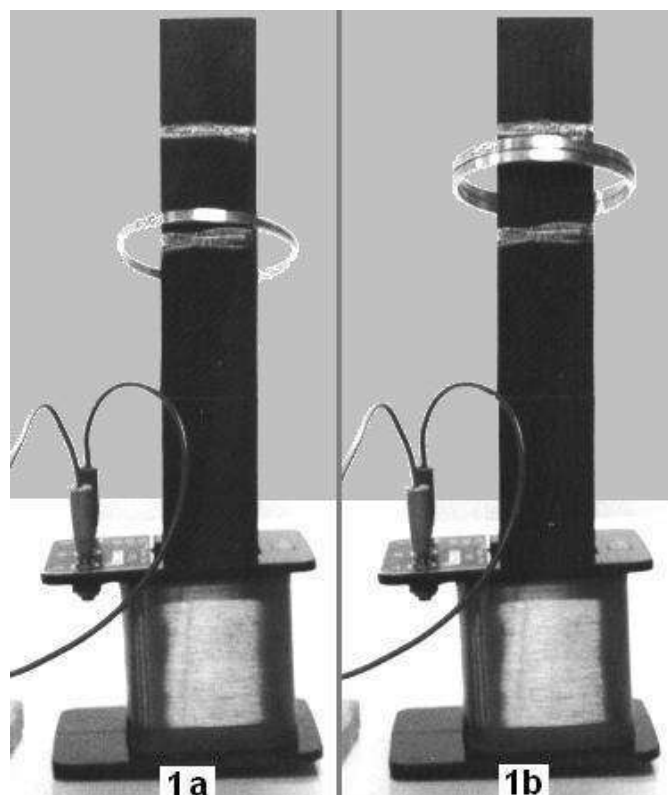


Figura 1 – Demonstração da “levitação magnética” com uma argola (1a) e duas argolas (1b).

Pelo interesse que desperta nos alunos, e por ser uma prática de laboratório simples, o experimento da levitação magnética é frequentemente demonstrado em cursos de eletromagnetismo. Infelizmente, não se explica a levitação da argola num simples “abano de mãos”. Essa dificuldade pode estar sendo subestimada em certas explicações demasiadamente resumidas que se encontram na literatura. Por exemplo, alguns autores apresentam explicações como as seguintes: “a polaridade do campo magnético gerado pela argola é idêntica à polaridade do campo gerado na bobina do primário, resultando então uma força de repulsão entre ambos” (Araújo e Müller, 2002; p. 118) ou “o campo magnético dessa corrente induzida (corrente induzida na argola) se opõe ao campo magnético da bobina” (Walker, 1990; p. 470). Na verdade estas justificativas constituem *petição de princípio* – “erro lógico que consiste em tomar por estabelecida, sob uma forma um pouco diferente, a própria tese que se trata de demonstrar” (Lalande, 1993; p. 815) –. O que precisa ser explicado é como ocorre a repulsão da argola, já que também poderia existir atração sobre ela². Demonstraremos adiante que em algumas etapas do ciclo das correntes elétricas que circulam na bobina e na argola ocorre atração, ao passo que em outras ocorre repulsão, sendo o efeito médio, ao longo do ciclo completo,

² – Uma bobina e uma espira próximas uma da outra, podem interagir atrativa ou repulsivamente quando percorridas por correntes elétricas. Desta forma, uma explicação satisfatória para a levitação, deverá reconhecer a possibilidade da existência desses dois efeitos e justificar como acaba prevalecendo o efeito repulsivo que faz a argola levitar.

preponderantemente repulsivo. Portanto, o procedimento comum de restringir a explicação do fenômeno à ocorrência exclusiva de repulsão é incompleto e, em última análise, conduz a uma explicação incorreta.

Na figura 1 também é mostrado o que acontece quando uma segunda argola, idêntica à primeira, é justaposta à primeira. A força de repulsão, na posição da figura 1a, aumenta, levando as duas argolas a levitarem mais distantes do primário (figura 1b). As marcas brancas no núcleo de ferro permitem comparar as duas situações. Se a inclusão da segunda argola não afetasse a força magnética já existente sobre a primeira, esta continuaria a levitar no mesmo lugar onde levitou na situação apresentada na figura 1a.

O objetivo do presente trabalho é apresentar uma explicação qualitativa para esses efeitos, já que tal explicação raramente é encontrada, particularmente em livros-texto, inclusive naqueles em que há referências ao “*anel de Thomson*” ou ao “*anel saltante*”.

II – A interação magnética

É bem sabido que duas espiras ou anéis percorridos por corrente elétrica interagem magneticamente. Essa interação pode ser atrativa – quando o sentido das duas correntes é o mesmo –, ou repulsiva – quando o sentido das duas correntes é diferente –. A figura 2 é uma ilustração dessas duas possibilidades.

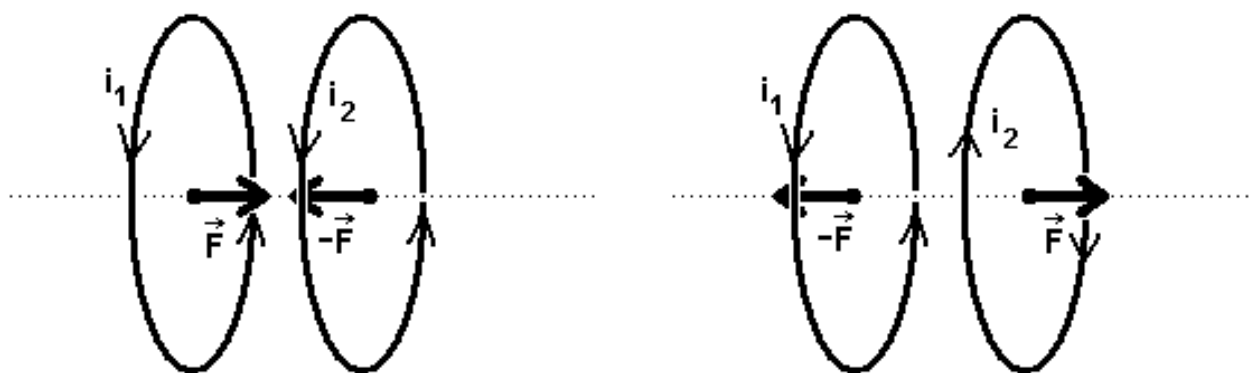


Figura 2 – Duas espiras com corrente elétrica interagem magneticamente.

A figura 3a representa um solenóide, conduzindo uma corrente elétrica i_1 , juntamente com algumas linhas de indução magnética. Um pouco à direita do solenóide encontra-se um anel, conduzindo uma corrente elétrica i_2 , de mesmo sentido que i_1 . Quando as correntes elétricas têm o mesmo sentido, a interação entre o solenóide e o anel é atrativa.

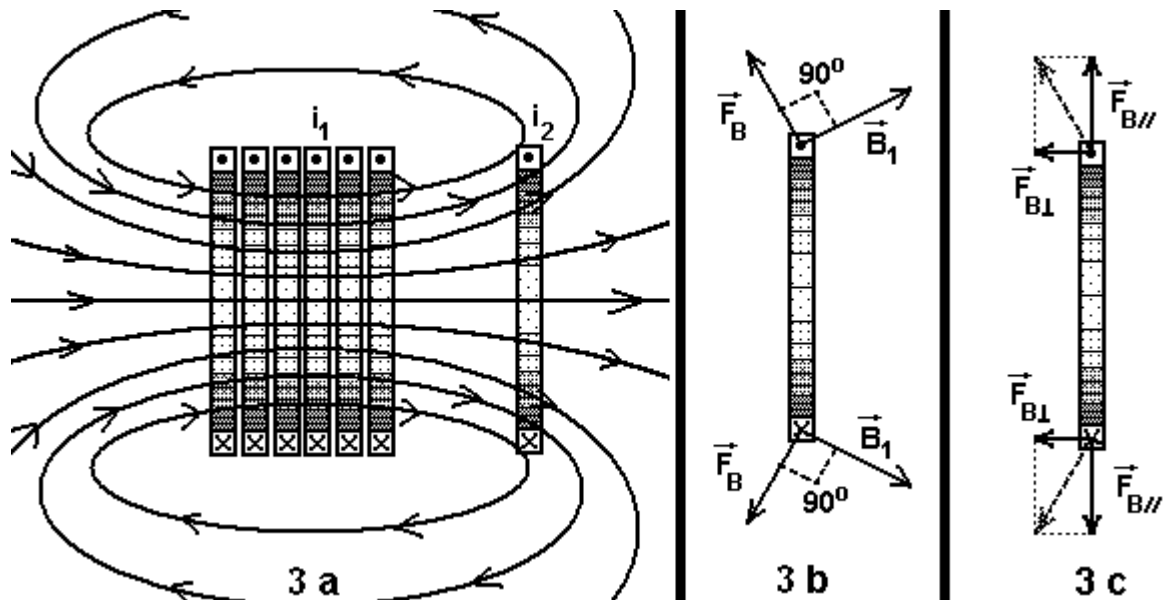


Figura 3 – Interação magnética entre um solenóide e uma única espira.

Na figura 3b estão indicados, em cada um de dois pontos simétricos do anel, o vetor indução magnética \vec{B}_1 , produzido por i_1 , e o vetor \vec{F}_B , representando a força magnética exercida sobre o anel. A figura 3c mostra apenas a força magnética \vec{F}_B , agora decomposta em duas componentes, uma paralela ao plano do anel e a outra perpendicular a esse plano – $\vec{F}_{B//}$ e $\vec{F}_{B\perp}$. O somatório, sobre todos os pontos do anel, das componentes $\vec{F}_{B\perp}$, tem como resultante uma força magnética que aponta para o solenóide e, sendo assim, a interação entre o solenóide e o anel é atrativa. Bastaria inverter ou i_1 ou i_2 para que a força sobre o anel se tornasse repulsiva. Nos dois casos o efeito se deve ao fato de que o solenóide não produz uma indução magnética uniforme. Se a indução magnética sobre o anel fosse uniforme, não haveria força magnética resultante e, conseqüentemente, não haveria nem atração nem repulsão.

III – A lei de Faraday-Lenz e a lei de Lenz

A *lei de Faraday-Lenz* relaciona a força eletromotriz induzida, e não a corrente induzida, com a taxa de variação do fluxo magnético no tempo. Esta lei afirma que a força eletromotriz induzida ε tem valor igual ao módulo da derivada temporal do fluxo magnético $\frac{d\Phi_B}{dt}$ e sinal contrário ao da taxa de variação do fluxo. A expressão matemática da lei é a seguinte:

$$\varepsilon = - \frac{d\Phi_B}{dt} \approx - \frac{\Delta \Phi_B}{\Delta t} \quad (1)$$

Nessa equação, o sinal negativo expressa o fato de a força eletromotriz induzida se opor à taxa de variação do fluxo magnético (*lei de Lenz*). Entretanto, é comum nos livros-texto de Física se enunciar a *lei de Lenz* em termos da corrente induzida. Em tal procedimento está implícito que a corrente induzida tem o mesmo sinal da força eletromotriz induzida. Se isto sempre fosse verdade, o anel não levitaria, como provaremos adiante.

A figura 4 representa uma espira que, ao conduzir uma corrente i_1 variável no tempo, produz ao seu redor uma indução magnética variável. Em outra espira, que se encontra próxima, ocorrerá uma variação temporal do fluxo magnético. A taxa de variação no tempo do fluxo magnético que a corrente variável i_1 da primeira espira produz sobre a segunda, tem o mesmo sinal da taxa de variação no tempo da corrente i_1 . Desta forma, de acordo com a *lei de Faraday-Lenz*, na segunda espira há uma força eletromotriz induzida ε_2 , com sinal contrário ao da taxa de variação no tempo da corrente i_1 . O sentido da força eletromotriz induzida está indicado na figura 4. Quando a corrente i_1 decrece (e portanto sua taxa de variação é negativa), a força eletromotriz induzida ε_2 é positiva (tem o mesmo sentido de i_1). Quando a corrente i_1 aumenta (e portanto sua taxa de variação é positiva), a força eletromotriz induzida ε_2 é negativa (tem sentido contrário ao de i_1).

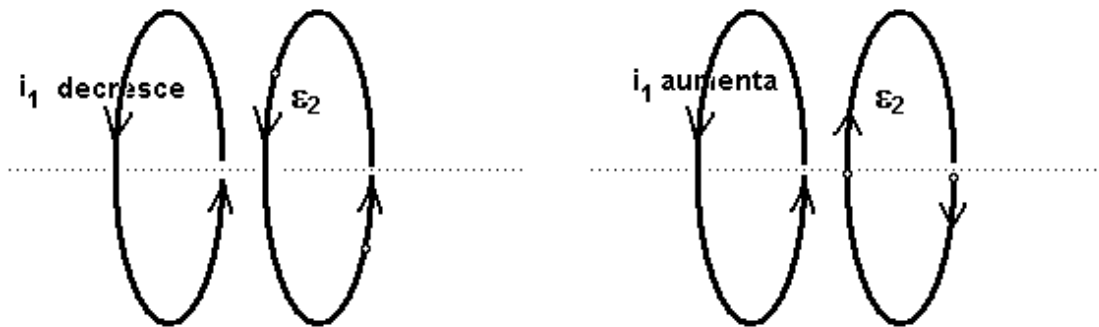


Figura 4 – Sentido da força eletromotriz induzida segundo a lei de Faraday-Lenz.

Se a corrente elétrica induzida i_2 tiver o mesmo sinal da força eletromotriz induzida ε_2 (o que não é necessariamente verdade), haverá atração entre as espiras quando i_1 decresce e repulsão quando i_1 aumenta (ver figura 2). Ora, no dispositivo proposto para a levitação do anel, a corrente elétrica indutora i_1 na bobina é alternada, significando que, ao longo de um ciclo completo, para cada instante em que a corrente aumenta a uma determinada taxa, existe um correspondente instante em que ela diminui na mesma proporção. Desta forma, poderá ocorrer atração e repulsão entre a bobina e o anel. Percebe-se então que, ao longo de um ciclo completo, sempre haverá repulsão e sempre haverá atração, mas não na mesma intensidade, como demonstraremos adiante.

IV – A defasagem entre a corrente elétrica no primário, a força eletromotriz e a corrente elétrica no anel

No caso específico do “*anel de Thomson*”, a corrente elétrica na bobina primária é alternada e pode ser descrita matematicamente por uma curva senóide cujo argumento é função do tempo. Como o fluxo magnético que o primário produz sobre o secundário (anel) depende diretamente da corrente i_1 no primário, o fluxo tem o mesmo sinal da corrente elétrica no primário. De acordo com a *lei de Faraday-Lenz*, a força eletromotriz induzida ε_2 no anel é dada pela função cosseno multiplicada por menos um, já que ela é obtida derivando-se, em relação ao tempo, o fluxo magnético (que é dado pela função seno) e multiplicando essa derivada por menos um (*lei de Faraday-Lenz*). Assim sendo, a força eletromotriz induzida ε_2 no anel atrasa-se $\frac{1}{4}$ de ciclo (90°) em relação à corrente i_1 no primário. O gráfico da figura 5 representa, ao longo de um ciclo completo, a variação da corrente i_1 no primário (linha contínua) e a variação da força eletromotriz induzida ε_2 no secundário (linha tracejada), em função do tempo.

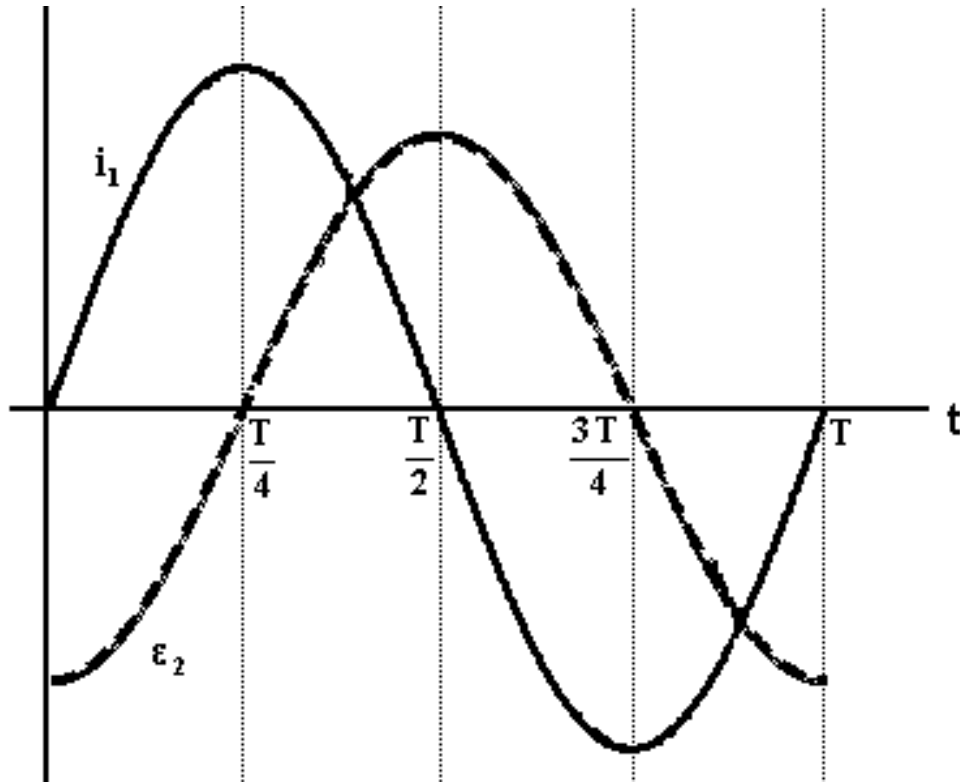


Figura 5 – Gráfico da corrente elétrica no primário e da força eletromotriz induzida no anel em função do tempo.

Devido à defasagem entre i_1 e ε_2 , identificamos em um mesmo ciclo, dois intervalos de tempo ($T/4 < t < T/2$ e $3T/4 < t < T$) durante os quais i_1 e ε_2 têm o mesmo sinal e, outros dois ($0 < t < T/4$ e $T/2 < t < 3T/4$), durante os quais i_1 e ε_2 têm sinais contrários.

Se a corrente i_2 no secundário tivesse sempre o mesmo sinal da força eletromotriz induzida³, em dois quartos de ciclo a força no anel seria repulsiva e em dois quartos de ciclo a força no anel seria atrativa. Então o efeito médio sobre um ciclo inteiro seria nulo e o anel não levitaria. Entretanto, a corrente elétrica i_2 no secundário (anel) não terá sempre o mesmo sinal da força eletromotriz ε_2 induzida pelo primário, pois o secundário possui auto-indutância. A auto-indutância funciona como se a corrente elétrica tivesse “*inércia*” (Nussenzveig, 1997) e determina que a corrente i_2 se atrase em relação à força eletromotriz induzida ε_2 . O retardo será máximo, isto é, $\frac{1}{4}$ de ciclo, no caso ideal em que o anel não apresenta resistência elétrica. Contudo, em uma situação prática, o retardo efetivo da corrente i_2 , em relação à força eletromotriz induzida ε_2 , depende da razão da auto-indutância pela resistência elétrica do anel. Quanto maior for esta razão, tanto mais o atraso tenderá para $\frac{1}{4}$ de ciclo.

Pois bem, como a força eletromotriz induzida ε_2 já sofre naturalmente um atraso de $\frac{1}{4}$ de ciclo em relação à corrente i_1 no primário, o papel da auto-indutância no secundário é fazer com que o atraso da corrente i_2 no anel, em relação à corrente i_1 no primário, seja ainda maior do que $\frac{1}{4}$ de ciclo, pois à defasagem de $\frac{1}{4}$ de ciclo entre i_1 e ε_2 , acrescenta-se o atraso de i_2 em relação a ε_2 . No caso extremo de não haver resistência elétrica no anel, o retardo de i_2 em relação a i_1 perfaz $\frac{1}{2}$ ciclo. Portanto, se o anel fosse um auto-indutor sem resistência elétrica, as correntes no primário e no anel teriam, em qualquer momento, sentidos opostos e, assim, haveria sempre repulsão magnética do anel pela bobina. O caso real, o do anel que possui resistência elétrica não nula, determina um atraso da corrente i_2 no secundário que é maior do que $\frac{1}{4}$ de ciclo, em relação à corrente i_1 na bobina, e menor do que $\frac{1}{2}$ ciclo, em relação à mesma corrente. Esta é a situação representada na figura 6, para um ciclo completo.

³ – Como já dissemos, a atribuição de mesmo sinal à força eletromotriz e à corrente elétrica induzida é tacitamente feita nos livros-texto ao enunciarem a lei de Lenz. Em um circuito de corrente alternada, a corrente elétrica terá sempre o mesmo sinal da força eletromotriz só se ele for exclusivamente resistivo; em circuitos capacitivos e/ou indutivos, haverá defasagem, exceção feita à situação de ressonância.

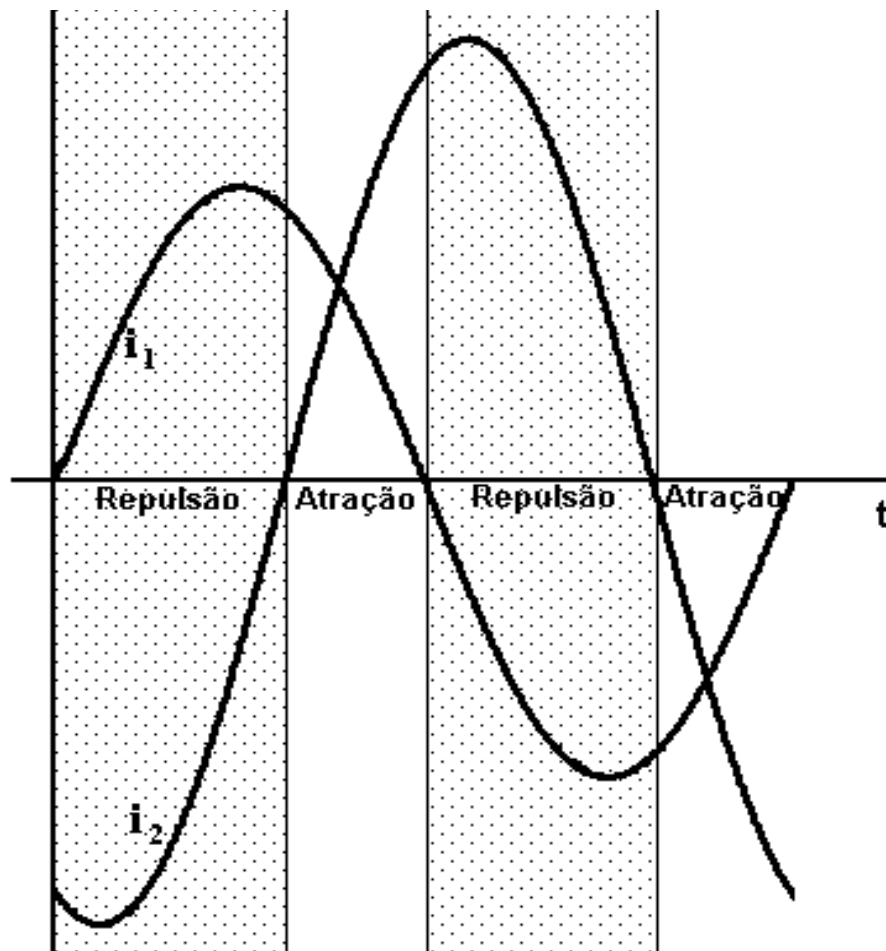


Figura 6 – Correntes elétricas na bobina e no anel defasadas por mais do que $\frac{1}{4}$ ciclo e menos do que $\frac{1}{2}$ ciclo.

A mesma figura também identifica as regiões onde as duas correntes terão sentidos opostos (regiões achuradas) e, portanto, nas quais ocorrerá repulsão. Nas demais regiões as correntes têm o mesmo sentido, ocorrendo atração. Desta forma, ao longo de um ciclo haverá atração e repulsão⁴, mas o efeito médio será preponderantemente repulsivo. Tal fato é fácil de se inferir da figura 6 por duas razões: 1) é notório que os intervalos de tempo em que ocorre a repulsão são maiores do que os de atração; 2) em média as correntes elétricas durante a repulsão são maiores do que durante a atração. Em poucas palavras: o efeito preponderantemente repulsivo sobre o anel deve-se ao fato de que a corrente elétrica no anel (i_2) está atrasada mais do que $\frac{1}{4}$ de ciclo em relação à corrente elétrica na bobina (i_1).

⁴ – O fato de haver repulsão e atração ao longo do ciclo completo explica a vibração do anel enquanto levita. A frequência da força periódica exercida no anel é o dobro da frequência de alimentação pois, conforme se observa na figura 6, ao longo de um ciclo da corrente elétrica há duas atrações e duas repulsões.

V – Outros efeitos observados

Um efeito interessante, ao qual a literatura não se refere⁵, ocorre quando um segundo anel, idêntico ao primeiro, é justaposto a este. O que se observa é que a força repulsiva sobre o conjunto mais do que duplica. Se essa força simplesmente duplicasse, os dois anéis levitariam à mesma distância da bobina, pois o peso dos dois anéis é o dobro do de um. Entretanto, como mostra a figura 1b, o conjunto dos dois anéis se posiciona um pouco acima de onde o primeiro anel se encontrava (figura 1a). O motivo disto é que a auto-indutância do conjunto fica quase inalterada e, além disso, a resistência elétrica do conjunto é reduzida à metade. Desta forma não somente a intensidade da corrente elétrica quase que duplica⁶, como também aumenta a defasagem entre as correntes no primário e no anel (lembramos que a defasagem aumenta quando aumenta a razão da auto-indutância pela resistência elétrica). A consequência disso é que a força repulsiva exercida sobre os dois anéis, na hipótese de serem forçados a permanecer juntos na posição da figura 1a, seria maior do que o dobro da força que é exercida sobre um único anel nessa mesma posição. Então, estando soltos, os dois anéis se afastam um pouco mais do solenóide⁷ (figura 1b), até que uma nova posição de “equilíbrio”⁸ seja encontrada.

Outro efeito interessante ocorre quando o anel é resfriado em nitrogênio líquido. A força repulsiva aumenta muito, não apenas porque a resistência elétrica diminuiu, mas também porque cresce a razão da auto-indutância – que não é afetada pela temperatura – pela resistência elétrica, determinando um aumento da defasagem entre a corrente elétrica na bobina e no anel, aproximando-se de $\frac{1}{2}$ ciclo.

Se o anel de alumínio for cortado, interrompido, obviamente o efeito de levitação não acontece, pois a corrente elétrica induzida não existe. Demonstrar isto é importante para desqualificar uma “*explicação ingênua*” que atribui a levitação magnética a um efeito de magnetização do anel.

Finalmente, se o circuito primário não estiver ligado e o anel estiver apoiado sobre a bobina primária, a súbita alimentação do circuito primário produzirá um pulso de corrente grande no primário, maior do que a corrente máxima que ocorre quando a bobina primária já está alimentada durante algum tempo⁹. Quando o interruptor que permite alimentar a bobina primária é fechado, produz-se o pulso de corrente elétrica no primário. Este pulso determina um rápido crescimento do fluxo magnético através do anel, gerando uma corrente induzida com sinal contrário ao da corrente indutora e, em consequência, uma força magnética

⁵ – Nenhum dos artigos que constam da bibliografia deste trabalho menciona tal efeito.

⁶ – A intensidade da corrente elétrica em um indutor sob tensão alternada depende da resistência elétrica e da reatância indutiva (que por sua vez depende da auto-indutância e da frequência de alimentação).

⁷ – A interação dos anéis com o solenóide diminui quando aumenta a distância ao solenóide.

⁸ – O local onde os anéis levitam não é precisamente uma posição de equilíbrio, já que estão vibrando, oscilando com pequena amplitude. Eles oscilam em torno da posição na qual a força média ao longo de um ciclo é igual ao peso dos anéis.

⁹ – Os gráficos das figuras 5 e 6 são válidos quando a bobina primária já está alimentada durante algum tempo. O pulso de corrente elétrica que acontece, quando a alimentação é iniciada, não está representado nesses gráficos.

repulsiva muito intensa e suficientemente grande para lançar o anel para longe da bobina primária. Dependendo de como o sistema esteja dimensionado, o anel voará para fora do núcleo de ferro (*“anel saltante”*); neste caso o sistema pode ser considerado um “canhão eletromagnético”. Com um conjunto solenóide/anel adequadamente dimensionado, o salto do anel pode alcançar vários metros de altura e, se adicionalmente o anel for resfriado em nitrogênio líquido, ele saltará espetacularmente (podendo bater no teto da sala).

A figura 7 mostra meninos experimentando o *“anel saltante”* em uma Exposição Interativa de Física promovida pela UNIJUÍ (projeto “A Física para Todos”)¹⁰. Observa-se no ar um “anel” feito com uma caneca de alumínio sem fundo (vide a seta), depois de lançado pelo “canhão eletromagnético”.



Figura 7 – Meninos experimentando o *“anel saltante”* e a levitação magnética em uma das exposições itinerantes promovidas pela UNIJUÍ.

Conforme expusemos no início do trabalho, o nosso objetivo era apresentar uma explicação qualitativa para o *“anel de Thomson”* reconhecendo, inicialmente, a possibilidade da

¹⁰ – A fotografia foi gentilmente cedida pelo professor Hélio Bonadiman, coordenador do projeto.

existência de efeitos atrativos e repulsivos sobre ele, e justificando, a seguir, como é que acaba prevalecendo o efeito repulsivo. Foge desse escopo a abordagem quantitativa; o leitor nela interessado poderá consultar a bibliografia em língua inglesa indicada a seguir.

Agradecimentos

À Prof^ª. Maria Cristina Varriale agradecemos a leitura minuciosa deste trabalho e as críticas que permitiram o seu aprimoramento.

Bibliografia

ARAÚJO, M. S. T. e MÜLLER, P. “Levitação magnética”: uma aplicação do eletromagnetismo. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, Florianópolis, v.19, n.1: p. 115-120, 2002.

FORD, P. J. e SULLIVAN, R. A. L. The jumping ring experiment revisited. *Physics Education*, UK, v.26, p. 380-382, 1991.

HALL, J. Forces on the jumping ring. *The Physics Teacher*, vol.35, p. 80-83, 1997.

LALANDE, A. *Vocabulário técnico e crítico da filosofia*. São Paulo: Martins Fontes, 1993.

NUSSENZVEIG, H. M. *Curso de Física Básica 3 – Eletromagnetismo*. São Paulo: Edgar Blücher, 1997.

QUINTON, A R. The ac repulsion demonstration of Elihu Thomson. *The Physics Teacher*, v.17, p. 40-42, 1972.

SUMNER, D. J. E THAKKAR, A. K. Experiments with a ‘jumping ring’ apparatus. *Physics Education*, UK, v.7, n. 4, p. 238-242, 1972.

WALKER, J. *O grande circo da Física*. Lisboa: Gradiva, 1990.