

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS - UNICAMP

INSTITUTO DE FÍSICA GLEB WATAGHIN - IFGW

EDSON HIDEO KOGA

F 609 A - TÓPICOS DE ENSINO DE FÍSICA I
RELATÓRIO PRÉ-FINAL

CAMPINAS - SÃO PAULO

2019

EDSON HIDEO KOGA

RA: 170097



edsonhkoga(arroba)gmail(ponto)com

F 609 A - TÓPICOS DE ENSINO DE FÍSICA I
EXPERIMENTO SOBRE INDUTOR E APLICAÇÕES
RELATÓRIO PRÉ-FINAL

Professor: José Joaquim Lunazzi

Orientador: Francisco Paulo Marques Rouxinol

CAMPINAS - SÃO PAULO

2019

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	4
INTRODUÇÃO	5
RESUMO DO INDUTOR	6
Circuito LC	6
Transistores	7
Campo magnético	8
Corrente induzida	9
UTILIZAÇÃO	12
APLICAÇÕES NO ENSINO	14
Aulas de Física - Ensino Médio	14
Aulas de eletrônica - Ensino técnico	14
MONTAGEM DO INDUTOR	15
LISTA DE MATERIAIS E CUSTOS	19
DIFICULDADES	21
CRONOGRAMA DO PROJETO	22
REFERÊNCIAS	23
AVALIAÇÕES DO ORIENTADOR	25
APÊNDICE	26

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Prof. Dr. José Joaquin Lunazzi pela oportunidade do experimento e a ajuda durante as dificuldades encontradas.

Agradeço ao Prof. Dr. Francisco Paulo Marques Rouxinol pela receptividade e a oportunidade de trabalhar em seu laboratório, assim como suas orientações de estudos que ajudaram a conclusão do experimento.

Agradeço ao Técnico Teroslau Raronilo Perallis, que possibilitou que o projeto funcionasse e pelo grande aprendizado nesse período de trabalho, tanto na área de eletrônica quanto na física.

INTRODUÇÃO

Para explicar como os geradores elétricos (também chamados de alternadores), microfones, guitarras elétricas e transformadores operam, precisamos entender o princípio de indução eletromagnética. Um dos primeiros cientistas a documentar esta descoberta foi Michael Faraday em 1831, utilizando uma bobina feita por ele utilizando um fio de arame enrolado em uma bobina de papel interagindo com um ímã. O movimento do ímã (campo magnético) induz uma corrente na bobina, criando uma tensão na extremidades do fio da bobina; já a aplicação de um tensão na bobina induz o aparecimento de um campo magnético na proximidade da bobina.

Neste projeto vamos desenvolver um equipamento para criação de um campo magnético alternado utilizando um circuito elétrico chaveado e demonstrar em diversos experimentos aspectos importantes da teoria eletromagnética, entre elas a influência da eletricidade sobre o magnetismo, observado pelo físico Hans Christian Oersted que motivou pensadores como Andre-Marie Ampere, Baptiste Biot e Félix Savart e o processo contrário, a influência do magnetismo sobre a eletricidade, feito pelo Faraday.

Os experimentos citados tem objetivo de mostrar de uma forma visual as teorias que esses pensadores do século XIX desenvolveram para a transmissão de energia assim como a sua utilidade no século XXI. Desta forma esperamos poder ajudar professores a explicar para alunos importantes aspectos da tecnologia de nosso mundo como também o entendimento da natureza.

RESUMO DO INDUTOR

O indutor de corrente contínua consiste em dois transistores MOSFET que vão chavear o sentido da corrente nos indutores, essa alternância vai depender da carga e descarga dos capacitores ligados em paralelos, este oscilador é conhecido como ZVS (Zero Voltage Switch).

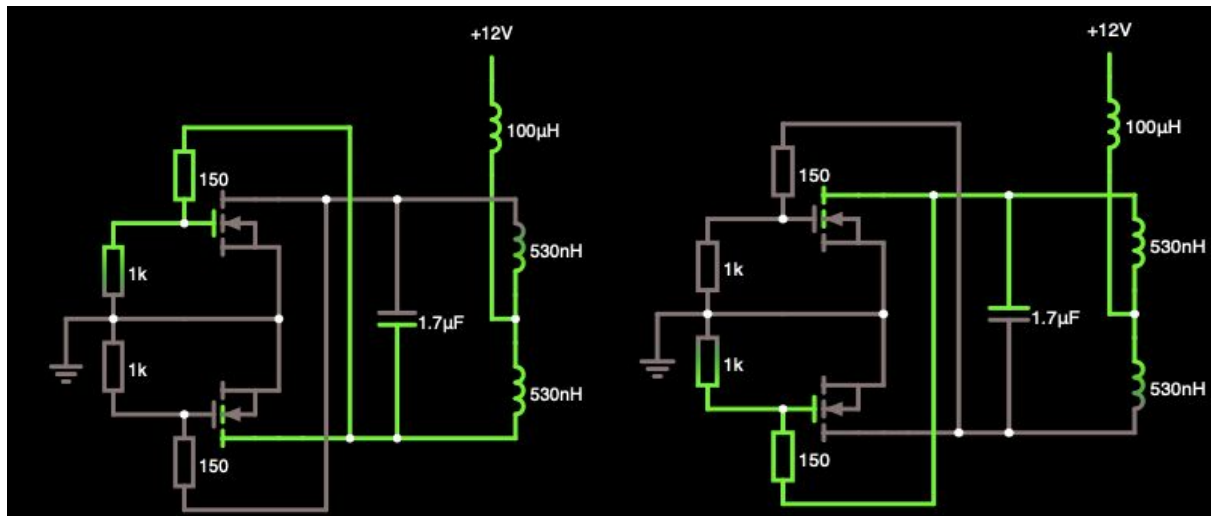


Figura 1 : Circuito do indutor, em verde o possível caminho da corrente, controlado pelos transistores.

Circuito LC

Considerando a parte LC do circuito, temos que a frequência de oscilação da corrente e a indutância da bobina é dada por:

$$f = 1/(2\pi\sqrt{LC}) \quad (1)$$

$$L = \mu_0\pi N^2 \frac{(Raio)^2}{Comprimento} \quad (2)$$

Em que C é a capacitância equivalente do circuito = $5 \cdot 0,33\mu F = 1,65\mu F$, L a indutância equivalente do circuito, N o número de espiras. Detalhes da conta no apêndice.

Para os indutores $L_1 = L_2$: raio = 1,5 cm, comprimento = 1,5 cm, N = 3.

$$L_1 = L_2 = 530 \text{ nF}$$

Para o indutor L_3 : raio = 0,5 cm, Comprimento = 5 cm, N = 10.

$$L_3 = 100 \text{ uF}$$

Substituindo os valores da capacitância e indutância temos:

$$f_{calculado} \approx 170 \text{ kHz}$$

O valor da frequência do indutor medido no laboratório foi de $f_{lab} \approx 137 \text{ kHz}$, próximo da ordem de grandeza esperado.

Transistores

Transistor é um dispositivo que possui três camadas de semicondutores com adições de impurezas (dopagem), alternando o tipo P ou tipo N, sua função é aumentar o ganho da corrente que opera com portadores de cargas majoritários e controlar a corrente dos terminais. Sua distribuição pode ser no tipo NPN ou PNP. Dessas junções resultam em três zonas de condições: coletor (C), base (B) e emissor (E). Quando uma tensão correta (positiva ou negativa) é aplicada à base, o transistor “abre”, funcionando como condutor, permitindo que uma corrente elétrica flua entre emissor e coletor e alimente o indutor, caso contrário, o transistor “fecha” impedindo a passagem da corrente.

Normalmente os semicondutores são feitos de silício, um material da família do carbono (4A). A dopagem do tipo N ocorre com a adição de um elemento da família do nitrogênio (5A) fósforo ou arsênio, com objetivo de deixar elétrons livres. O arsênio tem cinco elétrons por átomo da banda de valência e o silício quatro, consequentemente quatro elétrons do arsênio serão utilizados na ligação covalente, sobrando apenas o quinto elétron. Com uma pequena energia de ligação com o arsênio, esse último elétron pode ser facilmente ionizável, indo para a banda de condução.

No caso do tipo P ocorre um processo similar: adicionando um elemento químico da família do boro (3A): boro ou gálio, com intuito de deixar um déficit de elétron na ligação covalente. O resultado é a formação de um buraco que pode se deslocar através da estrutura, à medida que elétrons sucessivos preenchem um buraco e criam outro.

Os transistores utilizados são do tipo MOSFET (Metal Oxide, Semiconductor Field Effect Transistor, em português: transistor de efeito de campo metal -óxido -semicondutor) de canal N. São dispositivos eletrônicos de 3 terminais: dreno (D), source (S) e gate (G), em que o gate fica isolado por um óxido de silício dos outros dois terminais e deve ser ligada no positivo. A escolha do MOSFET é devido o isolamento do gate com o source, possibilitando trabalhar com alta carga de potência, e a sua boa performance conforme o aumento da temperatura.



Figura 2: A esquerda o transistor bipolar: B C e E representa a base, coletor e emissor. A direita o MOSFET: G, D e S representa o Gate, Dreno e Source.

O MOSFET também possui uma parte metálica atrás, a qual, é necessário juntar com dissipadores para auxiliar a dispersão do calor [mais detalhes na parte da montagem e dificuldades].

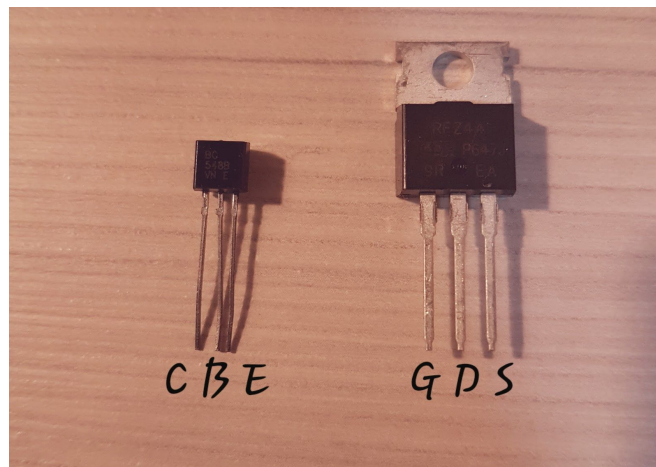


Figura 3: Comparação de um transistor bipolar com um MOSFET.

Campo magnético

A relação da eletricidade com o magnetismo, fenômeno observado pelo físico Hans Christian Oersted em 1820 em que percebeu que uma agulha magnética sofria influências ao aproximar de um fio com corrente elétrica. Sua publicação motivou alguns pensadores como, Andre-Marie Ampere que observou que as correntes em fios paralelos com o mesmo sentido repeliam os fios e correntes no sentido oposto os atraíam, estabelecendo as primeiras teorias matemáticas (diferente da que é apresentada nos livros didáticos) e Baptiste Biot e Felix

Savart publicaram a expressão matemática em que leva seus nomes, para o campo magnético a partir do estudo da interação de um ímã permanente com um fio longo com corrente.

Segundo a lei de Biot-Savart, haverá um campo magnético a partir da corrente que passa pelo indutor. Em um solenóide, pela simetria podemos aplicar a lei de Ampère e ver que o campo magnético será mais intenso no centro das espiras (mais detalhes no apêndice).

$$B = \int \frac{\mu_0 dI \cdot \hat{r}}{4\pi r^2} \quad (3) \quad ; \quad B_{solenóide} = \mu_0 nI \quad (4)$$

μ_0 é a permeabilidade magnética no vácuo, n é o número de espiras por unidade de comprimento e I a corrente elétrica

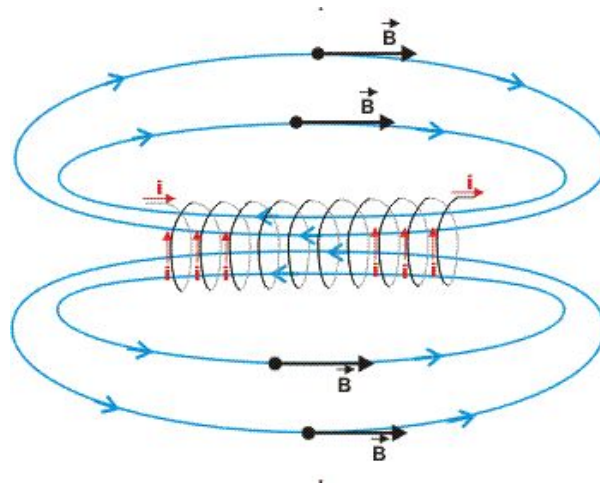


Figura 4 : Ilustração do sentido do campo magnético a partir de uma corrente i em um solenóide finito.[6]

Corrente induzida

Oersted mostrou a relação da eletricidade com o magnetismo a partir de corrente gerada por pilhas ou baterias, e Michael Faraday descobriu uma maneira diferente de gerar corrente elétrica fazendo o processo contrário, a partir de uma variação do campo magnético, fazendo o casamento da eletricidade e campo magnético, atribuindo seu nome a lei da indução eletromagnética.

A primeira formulação matemática a lei de Faraday foi feita pelo Franz Ernst Neumann em que a força eletromotriz é o negativo da variação do campo magnético pelo tempo (equação 6), a qual, termo negativo diz a respeito do sentido da corrente que foi formalmente expressado pelo físico Heimrich Lenz.

Segundo a lei de Lenz, ao aproximar uma espira (ou bobina), surgirá uma corrente induzida, a qual, o sentido é oposto a variação do campo magnético pelo tempo. Como o sentido da corrente do indutor fica invertendo com uma alta frequência, haverá uma mudança no sentido do campo magnético, conseqüentemente a corrente induzida também irá se alternar em mesma frequência.

O fluxo magnético em um solenóide é dado por:

$$\varphi = N \int_{c(s)} \vec{B}(t) \odot \vec{da} \quad (5)$$

N é o número de espiras do solenóide

Se o fluxo magnético que passa através de uma espira sofrer uma variação (mudando o valor de B ou seu sentido), uma força eletromotriz (FEM) é induzida na espira, como resultado, surgirá uma corrente induzida. Esta relação é chamada de lei de Faraday-Neumman-Lenz:

$$\varepsilon(t) = - \frac{d\varphi}{dt} = - \frac{d}{dt} \left(N \oint_s \vec{B}(t) \odot \vec{da} \right) \quad (6)$$

A resistência da peça ao fluxo de corrente induzida causa o aquecimento por perdas pelas correntes parasitas (ou correntes de Foucault), que por sua vez, ocorrerá o efeito Joule.

$$Q = R \int_{t1}^{t2} i^2 dt \quad (7)$$

Q é o calor gerado; R é a resistência elétrica do material.

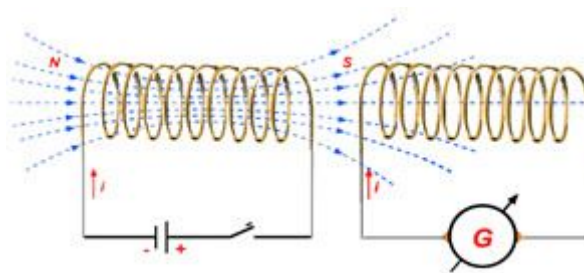


Figura 5: Ilustração mostrando uma corrente induzida a partir de um campo magnético da espira da esquerda [7].

Se o material aproximado ao indutor for do tipo ferromagnético, a intensidade do campo e a corrente parasita será maior em relação ao tipo paramagnético, ocorrendo um maior efeito joule (ou o efeito térmico). Isso acontece devido a um melhor alinhamento no

dipolo permanente (intrínseco dos elétrons) do material com a variação do campo magnético, pois, esses tipos de materiais, já possuem um alinhamento “natural” divididos em áreas relativamente pequenas, denominados domínios.

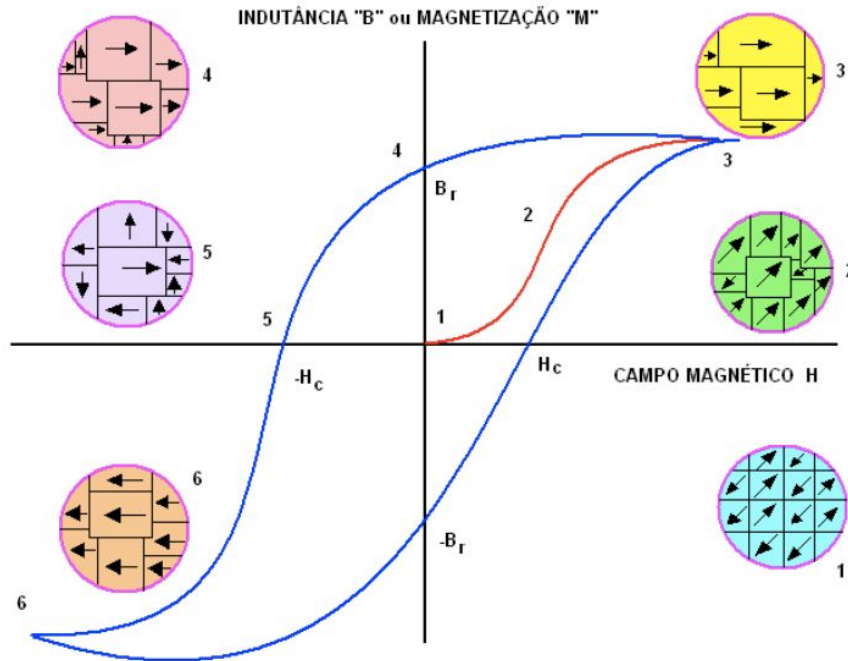


Figura 6 : Curva de Histerese característico dos materiais ferromagnético. (1): podemos notar os alinhamentos dos dipolos em domínios. Em (2) e (5): conforme o aumento do campo magnético H em uma direção, os domínios tendem a alinhar com o campo. (3),(4) e (5) alinhamento completo dos domínios de acordo com o campo. Note que o material não volta para o estado (1) ao cessar o campo magnético. Retirado em [8].

UTILIZAÇÃO

Um exemplo de aplicação é o fogão por indução, a qual existe um indutor abaixo do suporte da panela que irá induzir o material de ferro, gerando uma agitação das partículas, por consequência, aumentando a temperatura do material que, por condução, irá esquentar o conteúdo da panela. Vale ressaltar que o fogão não vai funcionar uma panela de vidro, alumínio, cobre ou barro, apenas em materiais ferromagnéticos, como panela de ferro ou aço, uma boa forma de testar se a panela é adequada basta aproximar um ímã.



Figura 7 : Imagem mostrando o cozimento do ovo apenas no contato com a panela.[9]

Pela sua velocidade e eficiência energética, o aquecimento por indução é bastante utilizado nas indústrias com diversas aplicações como: fusão, solda, tratamento térmico, pré-aquecimento para caldear, etc. Nestas aplicações, as correntes parasitas ficam concentradas na superfície do metal e diminuem em direção ao centro, esse efeito é chamado de efeito peculiar, e está relacionado com a frequência em que o campo varia.

A profundidade de penetração em um cilindro é dado por:

$$I = I_0 e^{-r/\delta} \quad (8) \quad ; \quad \delta = \frac{1}{\sqrt{\pi \mu f \sigma}} \quad (9)$$

δ é a profundidade de penetração em metros; σ é a condutividade elétrica do metal; μ_0 é a permeabilidade magnética no vácuo; f é a frequência do campo magnético; r é o raio do cilindro.

Para um aquecimento em pequena profundidade, deve-se usar correntes de alta frequência, para altas penetrações usa-se baixas frequências. O indutor produzido neste experimento se encontra em altas frequências: $f_{lab} \approx 137 \text{ KHz}$ e $\delta \approx 0,5 \text{ mm}$ para o aço.

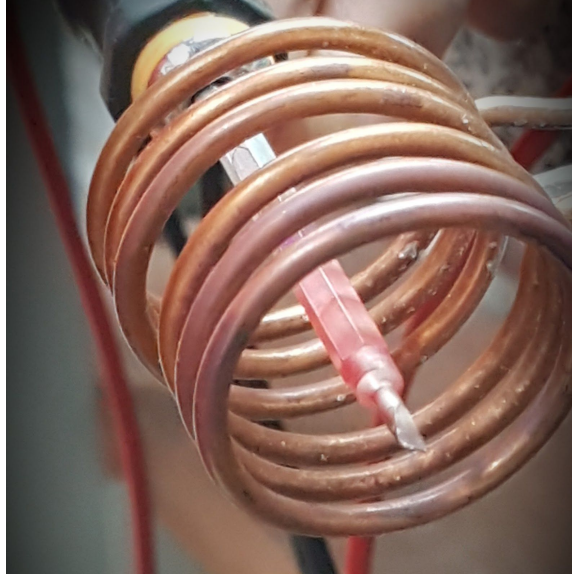


Figura 8: Aquecimento por indução de uma chave de fenda (feita pelo indutor do experimento), a temperatura do material incandescente está a $500 \text{ }^\circ \text{C}$

APLICAÇÕES NO ENSINO

O entendimento do circuito indutivo, pode ser utilizado nos níveis de ensino médio e técnico.

Aulas de Física - Ensino Médio

Os conceitos que podem ser trabalhado com os alunos são: circuitos, corrente contínua, corrente alternada, lei de ampere, lei de Faraday-Lenz, efeito joule, áreas da física moderna como a radiação do corpo negro além de trabalhar com a história da física. Este experimento tem com objetivo de deixar mais “visível” os efeitos e aplicações das transferências de energia.

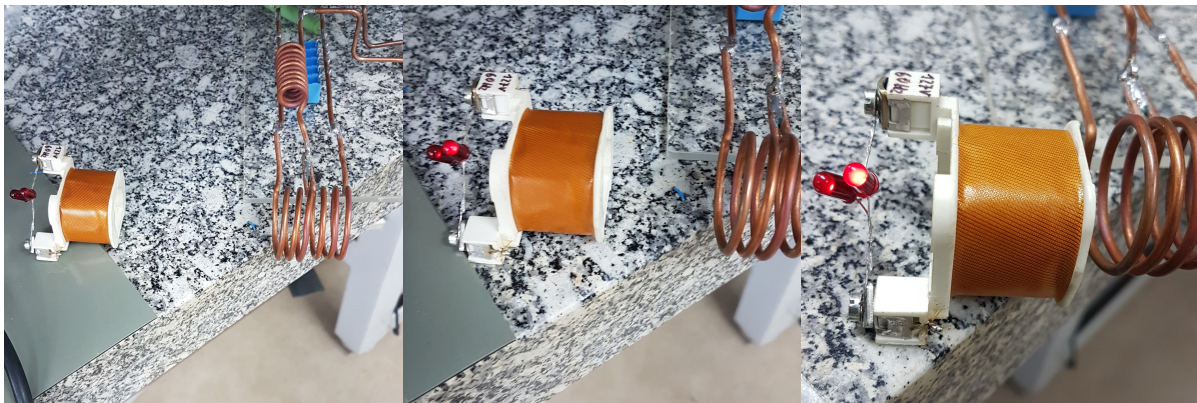


Figura 9: aproximação da bobina mostra os LEDs acendendo. O professor pode trabalhar com a transferência de energia entre os dois indutores, ou o motivo pela qual os leds não piscam, já que existe uma corrente alternada presente.

Se a escola tiver um modelo de ensino mais abrangente pode-se utilizar as competências do próximo tópico.

Aulas de eletrônica - Ensino técnico

A montagem do próprio circuito pode servir de estudo, pois, dentre as competências abordadas estão: aprendizado com circuitos, soldas, componentes eletrônicos como: capacitores, indutores, resistência e transistores, noções de uso de várias funções de um multímetro ou de osciloscópio como: medir corrente, tensão, resistência, capacitância, temperatura e frequência de oscilação.

MONTAGEM DO INDUTOR

Com a furadeira, foi realizado os furos nos dois dissipadores e foi utilizado uma pasta térmica para aumentar a troca de calor dos transistores com os dissipadores.

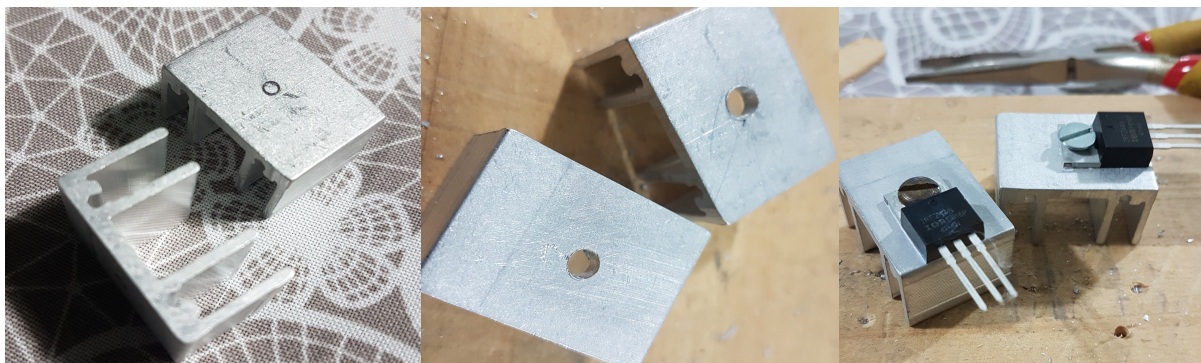


Figura 10 : Dissipadores antes e depois do furos e com os transistores instalados

Os cabos rígidos de 6 mm^2 foram descascados (o ideal seria fios esmaltados) e cortados do tamanho desejado para o projeto.

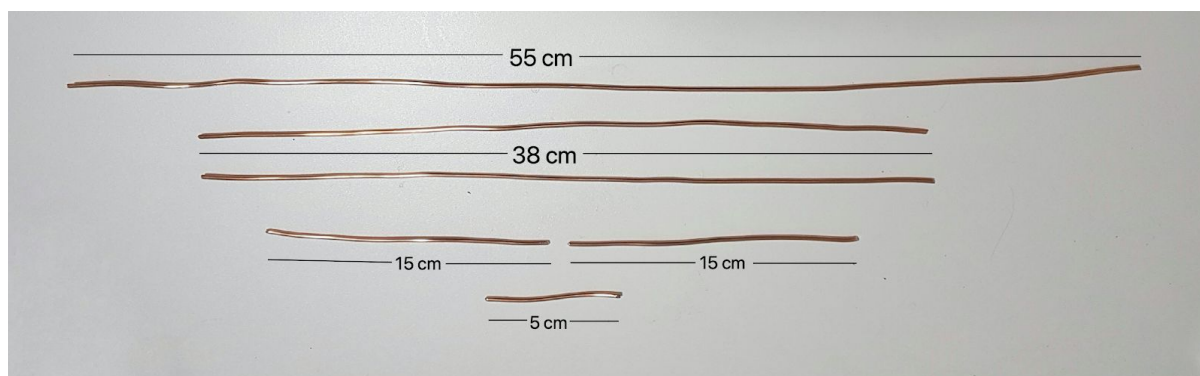


Figura 11: Corte do fio rígido 6 mm^2 : 2 fios de 15 cm , 2 fios de 38 cm , 1 fio de 55 cm e 15 cm

Os dois fios de 38 cm foram enrolados três vezes no objeto cilíndrico de 3 cm formando duas bobinas, tomando cuidado com o sentido das espiras (as duas bobinas precisam estar no mesmo sentido). O fio de 55 cm foi enrolado 10 vezes na broca de 1 cm de diâmetro, respeitando um espaço de 5 cm .

As duas bobinas de três voltas foram soldadas em série e a bobina de dez na junção das duas, é importante que a bobina maior esteja em perpendicular em relação às outras duas, para que os campos magnéticos de cada bobina não se afetem.



Figura 12: Figura da esquerda: indutores de 3 volts soldados em sequência. Figura da direita: indutor de 10 volts soldado em perpendicular com as outras duas.

Os outros pedaços de fios, assim como os componentes foram soldados de acordo com a imagem do circuito, é importante se atentar com as terminações dos transistores e se as soldas estão bem feitas.

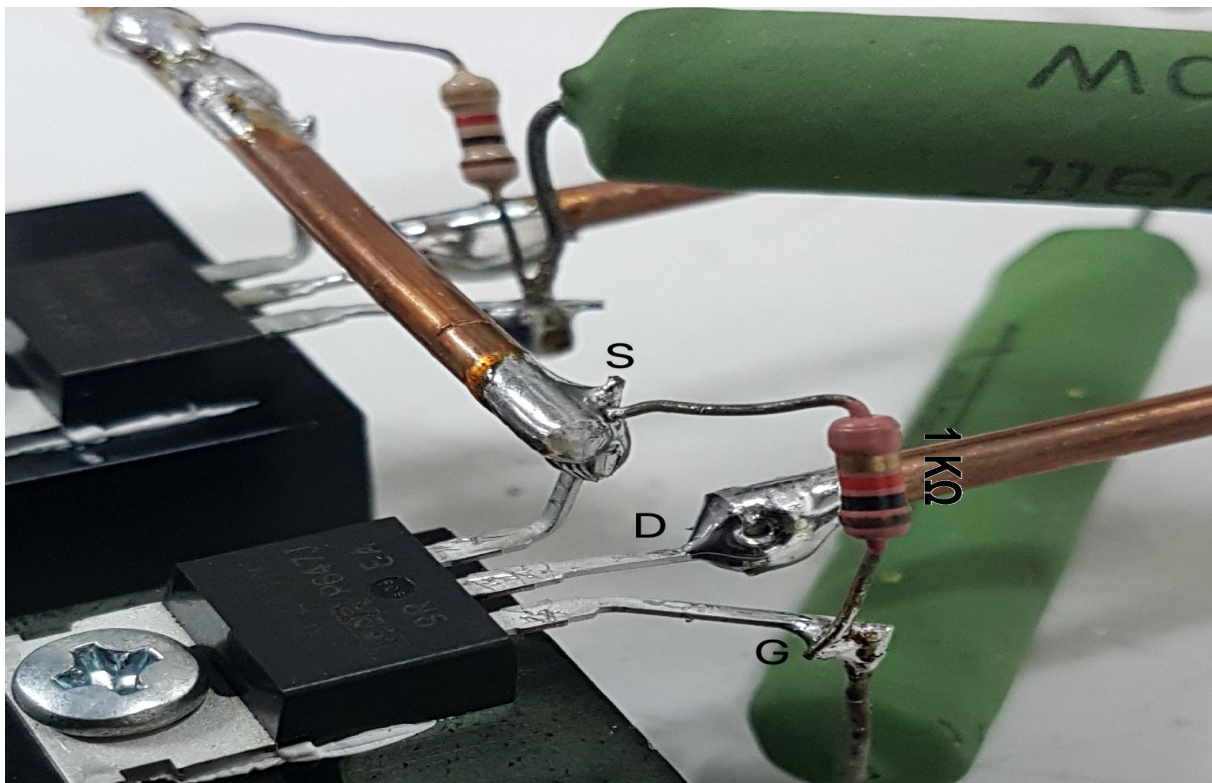


Figura 13: Ligações dos terminais dos transistores: S = Source, D = Dreno, G = Gate. Os formatos das “pernas” dos componentes ajudam a soldar os resistores de 1 KΩ e 150 Ω e o fio de cobre.

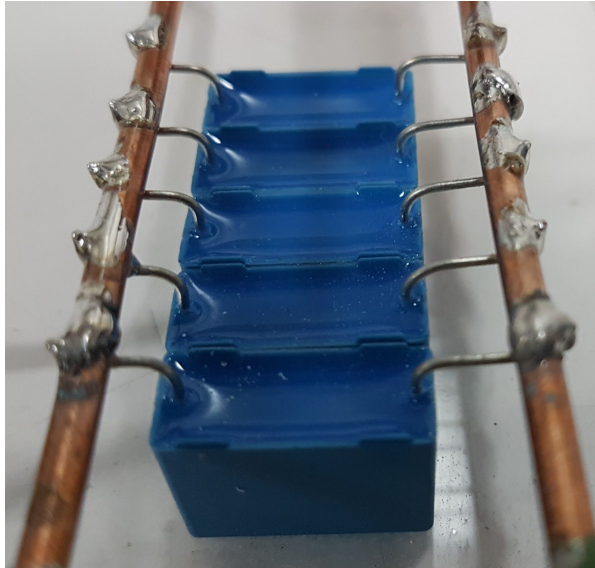


Figura 14: Ligação dos capacitores em paralelo, a capacitância equivalente será a soma das capacitância de cada componente.

Foi utilizado uma placa de acrílico como suporte e um conector de plastico para ligar o indutor em uma fonte.

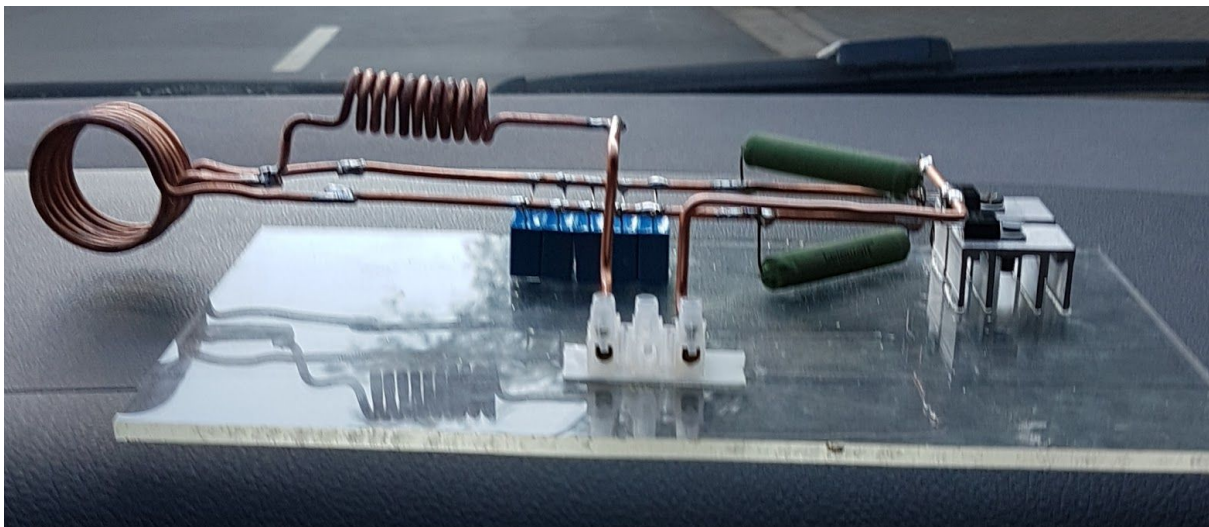


Figura 15: Imagem do indutor.

Ao longo do projeto, algumas alterações ocorreram: devido a queima dos transistores, necessitou a troca dos dissipadores para aliviar a temperatura e adição de uma chave para evitar o excesso de remoção dos cabos no conector.

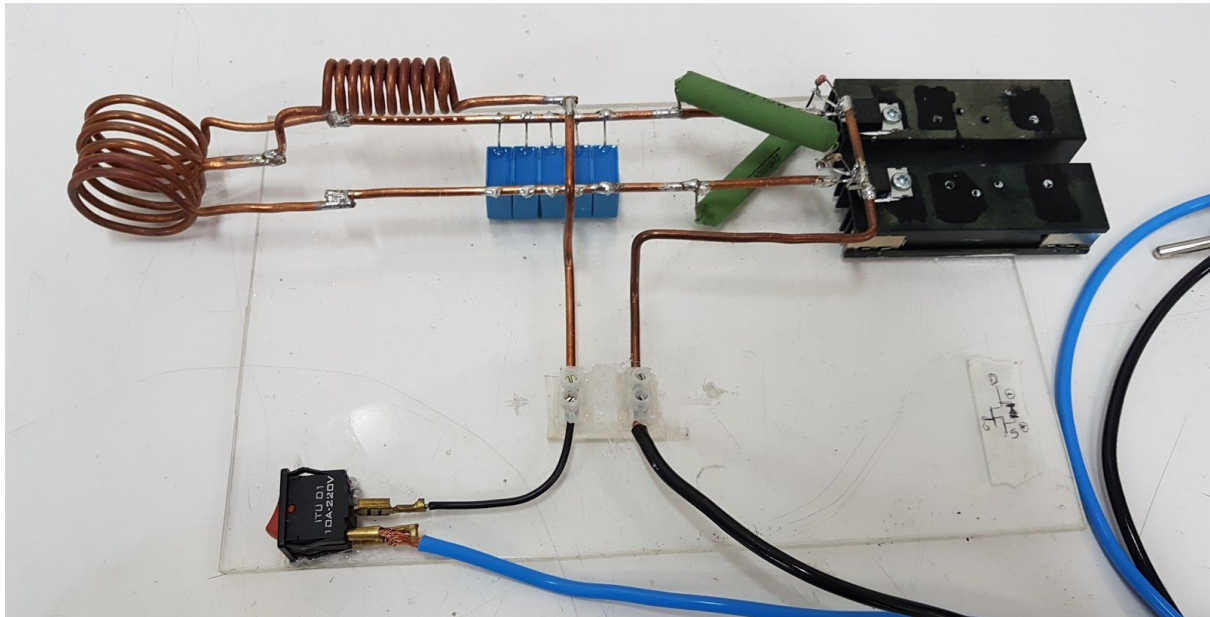


Figura 16 : indutor finalizado, com as adaptações realizadas após o relatório parcial.

Como resultado, além da figura 8 e 9, o indutor pode aquecer pequena quantidade de água, com apenas um clips no recipiente.



Figura 17: aquecimento de água por indução. Na primeira imagem a água está em temperatura ambiente, na terceira se encontra no estado de vaporização. O tempo para o processo foi de 30 segundos.

LISTA DE MATERIAIS E CUSTOS

Lista de materiais:

- 2 Transistores IRFZ44N - MOSFET.
- 2 Dissipadores.
- 2 Resistores 150Ω 2W ou 5W.
- 2 Resistores $1K\Omega$ 1/4W.
- 5 Capacitores $0,33\mu\text{F}$ x 250V de polipropileno (MKP) ou 3 Capacitores de poliéster (MKT) $6,8\mu\text{F}$ x 250V.
- 1 Bateria ácido chumbo 12V e 8A.
- 2 Metros de fio rígido secção de 4 mm^2 .
- 2 Pedacos de fio $0,25\text{ mm}^2$ de 9 cm cada.
- 2 Pedacos de fio flexível com secção de 4 mm^2 .

Ferramentas:

- Alicate de corte.
- Alicate de bico.
- Ferro de solda.
- Estanho.
- Cola quente ou fita dupla face.

Para ajudar:

- Objeto cilíndrico de 3 cm de diâmetro.
- Objeto cilíndrico de 1 cm de diâmetro.

Os componentes do indutor como os resistores e transistores são baratos, já os capacitores de polipropileno (MKP) e a bateria de 12V e 8A são caros e difíceis de se encontrar. Os capacitores MKP podem ser encontrados em fontes de computador, impressora, TV ou antigos discos rígidos externos. Pode-se substituir por capacitores de poliéster (MKT) de $6,8\mu\text{F}$, são mais acessíveis, entretanto, em altas temperaturas apresenta alguns problemas de dissipação.

Tabela 1: Orçamento do experimento.

Item	Descrição	Quantidade	Preço unidade	Total
1	Transistores - IRFZ44N	4	R\$ 3,50	R\$ 14,00
2	Dissipadores	2	R\$ 2,50	R\$ 5,00
3	Resistores 150Ω 10W	2	Adquirido no lab	-
4	Resistores 1KΩ 1/4W	2	Adquirido em sucata	-
5	Capacitores MKP	5	R\$ 8,00	R\$ 40,00
6	Fio 6 mm ² rígido	2 m	R\$ 2,00/m	R\$ 4,00
7	Fio 0,25 mm ²	1 m	R\$ 1,00/m	R\$ 1,00
8	Fio flexível 4 mm ²	2 m	R\$ 1,50/m	R\$ 3,00
9	Bateria	1	---	
-	-	-	TOTAL	R\$68,00



Figura 18: Na esquerda: capacitor MKP encontrado em uma fonte de computador. A direita: capacitores MKT como opção mais barata.

DIFICULDADES

Uma das dificuldades ao montar o indutor foi encontrar os componentes: os capacitores MKP e os fios de 4mm^2 não são mais vendidos em lojas de eletrônicos, o segundo apenas por encomenda de fábrica. A solução foi utilizar fios de 6mm^2 , no entanto, sua espessura dificultou o enrolamento do fio nos tubos de 3 cm e 1 cm de diâmetro. Para resolver o problema, utilizamos como tratamento térmico o recozimento que consistem em aumentar a temperatura do cobre até sua incandescência e resfriá-lo rapidamente, com o objetivo de amolecer o fio de cobre.

Outra dificuldade foi manter a temperatura baixa nos transistores, no primeiro teste, eles foram queimados devido à alta corrente. Realizamos outros testes em outro indutor, com controlador de tensão nos transistores, e ainda não obtivemos sucesso. Por usar uma fonte de alimentação e vez da bateria, acreditamos que a corrente fornecida pela fonte em relação à tensão, não é compatível para o indutor.



Figura 19: Imagem dos transistores queimados. Transistor da esquerda está curto-circuitado e o da direita está aberto. Foi necessário trocar as peças.

Devido a necessidade de altas correntes, alguns geradores não são compatíveis com o experimento, pois, dependendo do material, o indutor pode necessitar corrente de até 11 A.

CRONOGRAMA DO PROJETO

Os encontros com o orientador ocorrem semanalmente com duração de 4 horas, com o objetivo de pesquisar sobre o experimento e a sua montagem.

Agosto:

- Introdução ao curso e procura do orientador.
- Elaboração do experimento.
- Tema do projeto definido.

Setembro:

- Construção da lista de materiais.
- Compras dos materiais.
- Início das montagens do projeto.
- Queima de alguns materiais.

Outubro:

- Compra dos materiais queimados.
- Testes com outro indutor a procura de uma solução para o problema.
- Entrega do relatório parcial.
- Resolver os problemas encontrados.
- Finalizar o indutor.
- Planejamento e escrita da parte teórica no relatório.

Novembro:

- Ajuste final no indutor.
- Consulta com o professor.
- Procura de uma fonte elétrica acessível para o dia da apresentação.
- Apresentação.
- Entrega do experimento.

REFERÊNCIAS

1. David. J. Griffiths..*Eletrodinâmica*. 3a edição, Pearson, 2010.
2. R.Resnick, R Eisberg.*Física Quântica*.Elsevier Editora Ltda. 35a reimpressão, 1973.

Inspiração para o projeto:

3. Fim do Gás de cozinha, Youtube, 2019, em: <https://www.youtube.com/watch?v=dNSpdT4qLTc>. Acessado em: 07/09/2019.

Característica sobre os capacitores citados:

4. *EPCOS AG is a TDK Group Company*, Film Capacitors: General technical information 2018, em:
<https://www.tdk-electronics.tdk.com/download/530754/480aeb04c789e45ef5bb9681513474ba/pdf-generaltechnicalinformation.pdf>. Acessado em: 10/09/2019

Datasheet do transistor MOSFET

5. *IRFZ44N Datasheet (PDF) - International Rectifier*, em
[:https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/68619/IRF/IRFZ44N.html](https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/68619/IRF/IRFZ44N.html).
Acesso em 10/10/2019.

Utilização de imagens para fins didáticos:

6. Imagem retirada do site:
<https://www.alfaconnection.pro.br/fisica/eletromagnetismo/campo-magnetico/campo-magnetico-produzido-por-corrente-eletrica/>. Acessado em 10/11/2019.
7. Imagem retirada do site:
<https://brasilecola.uol.com.br/fisica/fluxo-magnetico-lei-faraday.htm>, Acessado em: 10/11/2019.
8. Imagem retirada do site: <https://casamarela.com.br/blog/panelas-de-inducao/>.
Acessado em: 10 /11/2019.

9. Imagem retirada do documento:

Fundamentos de ciências dos materiais, Martins. M. COMPORTAMENTO MAGNÉTICO DOS MATERIAIS. Acessado em: 10 /11/2019.

Consulta sobre os elementos químicos e suas propriedades citados:

10. Tabela periodica dinâmica, em: <https://www.ptable.com/?lang=pt>. Acessado em: 2/11/2019.

Consulta sobre o indutor funcionando como aquecimento de metais:

11. *AMBRELL Precision Induction Heating*: Sobre o aquecimento por Indução, em: http://cdn2.hubspot.net/hubfs/508263/Ambrell_PDFs/411-0169-18.pdf. Acessado em: 10 /11/2019.

Consulta sobre a historia da física:

12. ASSIS, A. K. T.; CHAIB, J. P. M. C. *Eletrodinâmica de Ampère: análise do significado e da evolução da força de Ampère, juntamente com a tradução comentada de sua principal obra sobre eletrodinâmica*. Campinas, SP: Editora Unicamp, 2011.

13. Assis, A. K. T. (1992 a) *Curso de Eletrodinâmica de Weber* (Notas de Física IFGW) Setor de Publicações do Instituto de Física da UNICAMP, Campinas).

14. https://pt.wikipedia.org/wiki/Lei_de_Biot-Savart Acessado em: 14 /11/2019.

15. https://pt.wikipedia.org/wiki/Lei_de_Ampère Acessado em: 14 /11/2019.

AVALIAÇÕES DO ORIENTADOR

(11/10/2019) - Parcial

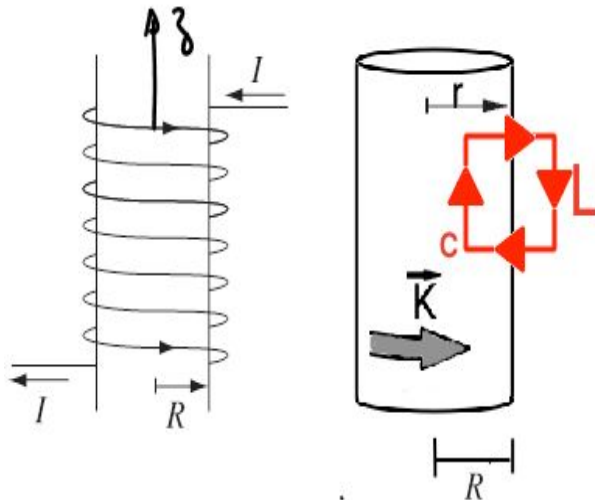
O relatório descreve parte das atividades do aluno EDSON HIDEO KOGA durante o período do relatório. Durante este período tivemos reuniões semanais sobre o projeto. O aluno trabalhou bastante tentando obter os materiais e construir o circuito elétrico do projeto. Muitos dos problemas surgiram durante a construção do circuito devido a dificuldade de soldagem dos dispositivos e obtenção das correntes e voltagens necessárias para o funcionamento do circuito (parte de chaveamento). No momento o estudante está trabalhando na montagem de fontes para geração de corrente/voltagem necessários para operar o equipamento, como também de novas bobinas para transmissão de potência. Devido ao trabalho feito durante este período e o esforço do estudante a nota até o momento é 10.

(14/11/2019) - Pré-final

O relatório descreve parte das atividades do aluno EDSON HIDEO KOGA durante o período do relatório. Durante este segundo período continuamos nossas reuniões semanais sobre o projeto e seu desenvolvimento. O aluno trabalhou bastante terminando a construção e teste do equipamento. Uma segunda etapa que foi trabalhada bastante foi o desenvolvimento dos experimentos para demonstração de como a indução funciona, e como utilizar estes experimentos para explicar para alunos de ensino fundamental e médio seu funcionamento. Devido ao trabalho feito durante este período e o esforço do estudante a nota até o momento é 10.

APÊNDICE

Seja o solenóide infinito:



Solenóide infinito: por simetria:

$$B = B(r)\hat{z}$$

Supondo n voltas por unidade de comprimento:

$$\vec{K} = K\hat{\theta}$$

Em que K = densidade superficial de carga, o quanto de corrente passa em um determinado espaço infinitesimal dl.

$$K = \frac{I'}{dl} = \frac{(ndl)I}{dl} = nI$$

Aplicando a lei de ampère em um solenóide infinito:

$$\oint_{c(s_0)} \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 I(s)$$

$$\oint_{c(s_0)} \vec{B} \cdot d\vec{l} = B_z(r)L = \mu_0 I(s) = \mu_0 (Ln)I$$

n é a quantidade de voltas por unidade de comprimento ao longo do tubo.

L é o comprimento da amperiana que envolveu a corrente I.

$$B_z(r) = \mu_0 nI = \mu_0 K \quad (r < R) \quad (I)$$

Agora, considerando o fluxo magnético sobre o próprio solenóide, temos:

$$\varphi = N \int \vec{B} \cdot d\vec{a} = NB\pi r^2 =$$

$$= N\mu_0 nI\pi r^2 = \frac{N^2\mu_0\pi I r^2}{l}$$

$$\varphi = \frac{N^2\mu_0 I \pi (\text{raio})^2}{\text{Comprimento}} \quad (II)$$

A indutância é dado por:

$$\varphi = LI$$

$$L = \frac{N^2\mu_0\pi(\text{raio})^2}{\text{Comprimento}} \quad (III)$$

