

PROJETO DE ELETROMAGNETISMO

TRANSMISSÃO DE ENERGIA SEM FIO (WIRELESS POWER TRANSFER – WPT)

OBJETIVOS DE APRENDIZAGEM

Nesse projeto, vocês serão capazes de:

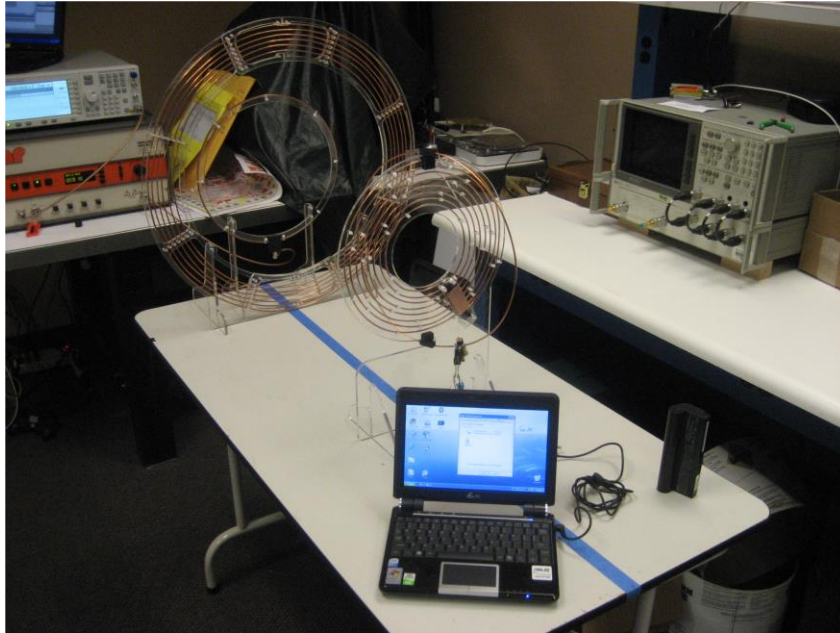
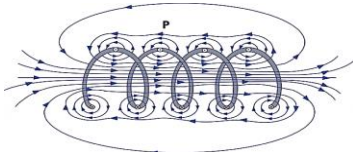
- Adaptar o modelo do transformador ao estudo do circuito WPT ressonante;
- Simular em Python o modelo do circuito WPT e identificar a frequência ótima de transmissão para cada condição de carga e coeficiente de acoplamento magnético;
- (para quem faz presencialmente) Montar um circuito WPT que consiga transmitir energia pelo ar para alguma aplicação de sua escolha;
- (para quem faz remotamente) Aprofundar as simulações por meio do cálculo numérico de indutâncias e da construção de gráficos de potência transmitida e eficiência em função da frequência e do coeficiente de acoplamento;
- Apresentar os resultados das simulações e validações a toda a turma;

INTRODUÇÃO

A primeira evidência de transmissão de energia elétrica através do ar ocorreu no século XIX, quando Nicola Tesla, conhecendo as relações entre corrente elétrica e campo magnético, mostrou que uma bobina percorrida por uma corrente alternada poderia induzir força eletromotriz em uma segunda bobina posicionada próxima à primeira. Isso permitiu o surgimento de tecnologias voltadas à geração de energia elétrica na modalidade alternada, bem como de projetos de transformadores de tensão com núcleos de ferro.

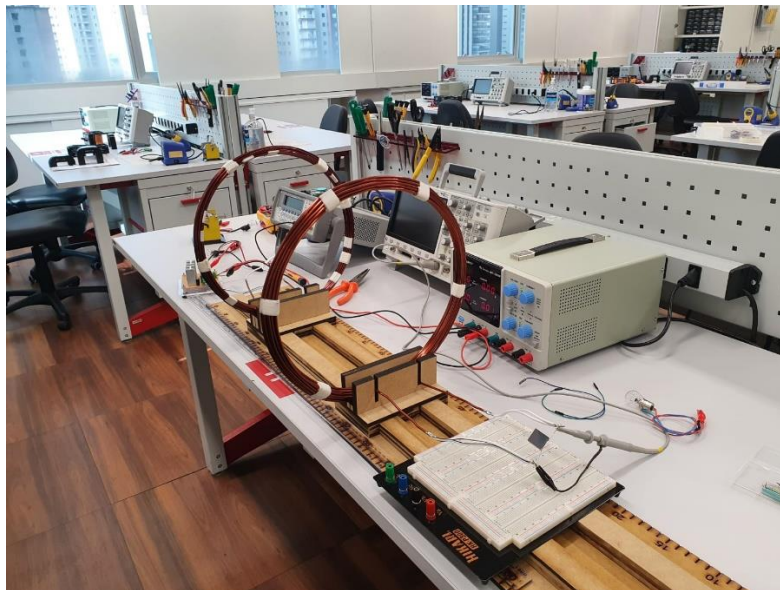
No ar, devido à dispersão do campo magnético e ao consequente baixo acoplamento entre duas bobinas, a transmissão de energia elétrica por indução sempre foi considerada possível apenas para pequenas distâncias. No entanto, com a evolução dos dispositivos eletrônicos, a ideia de nos livrarmos dos cabos e carregadores de bateria tornou-se possível, principalmente para telefones celulares e, talvez em pouco tempo, para os carros elétricos. Isso fez com que engenheiros buscassem estratégias diferentes para a transmissão de energia sem fio, tentando vencer a barreira da distância mínima entre as duas bobinas ou da necessidade de um meio ferromagnético para evitar a dispersão do campo.

Os principais avanços que ocorreram nas últimas duas décadas trazem à tona uma estratégia bem-sucedida para se aumentar a eficiência de transmissão entre duas bobinas pelo ar: o acoplamento ressonante. Essa técnica considera que o circuito receptor deva ter uma frequência natural de oscilação a mais próxima possível da frequência do campo magnético produzido pela fonte, que está conectada à bobina transmissora.



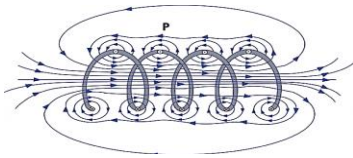
Computador energizado sem utilização de cabos

O acoplamento ressonante faz com que o campo magnético entre as bobinas aumente em intensidade, permitindo uma transmissão eficiente a maiores distâncias. O que tentaremos modelar nesse projeto é um **acoplamento de bobinas ressonantes que não estejam tão próximas**, sendo que somente o ar estará presente entre elas.



Bobinas acopladas sem o ferromagnético e a uma distância bem maior que os raios.

Para entendermos melhor essa estratégia de transmissão, precisamos compreender o que é a ressonância, fenômeno que ocorre com alguma frequência em nosso dia a dia. Para começar, imagine uma criança em um balanço pendular: ao darmos o primeiro empurrão na criança, perceberemos que o tempo de oscilação (tempo entre a ida e a volta) constitui o período de uma **oscilação natural**, que depende somente do



comprimento da corda do balanço e da aceleração da gravidade. Se dermos apenas um único empurrão, a criança irá oscilar na frequência natural e, devido à resistência do ar, a amplitude da oscilação decairá paulatinamente, até que o balanço pare. Se, por outro lado, continuarmos impulsionando a criança exatamente na frequência natural (ou seja, sempre a empurrando no exato instante em que ela retorna ao ponto inicial), perceberemos um crescimento paulatino da amplitude de oscilação, o que pode ser bastante perigoso para a criança. A fonte da oscilação, nesse caso, tem mesma frequência que a frequência natural de oscilação, condição necessária para que haja ressonância.

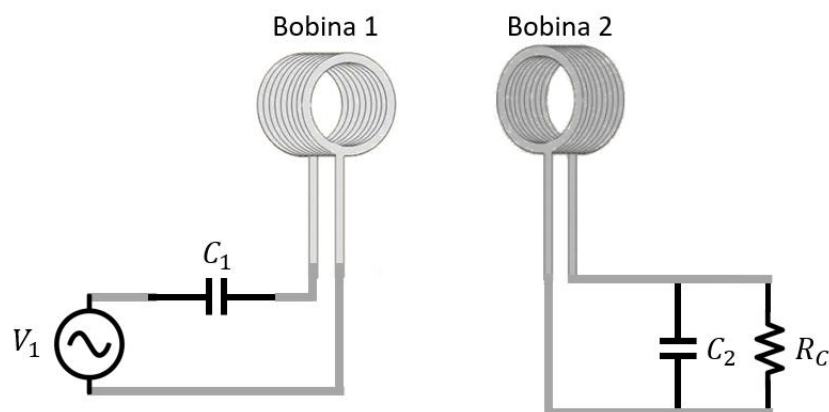
Repare em outro exemplo lúdico representado neste [vídeo](#), no qual uma fonte (o homem) perturba o meio (a água) com um período compatível com o tempo em que a perturbação no centro da piscina chega até sua borda e retorna até o centro da piscina. Nesse caso, as paredes da piscina refletem a perturbação que, de forma construtiva, soma-se à perturbação da fonte. Repare no fator de amplificação da amplitude da oscilação na água.

No caso da transmissão de energia sem fio, desejamos que ocorra o mesmo efeito tanto na bobina primária quanto na secundária, e para isso devemos associar as bobinas a capacitores, de modo a permitir que haja oscilação natural no conjunto indutor-capacitor. Se fizermos com que a fonte de tensão oscile na frequência de ressonância da primeira bobina, teremos nela uma corrente bem alta, a qual produzirá um campo magnético também elevado.

Imagine agora que as frequências de ressonância (frequências naturais) do primário e do secundário sejam exatamente iguais. A tensão induzida no secundário estará na mesma frequência do campo magnético, que é igual à frequência de ressonância do circuito secundário. Logo, teremos no secundário um campo magnético resultante, que será a soma do campo magnético produzido pela primeira bobina e do campo próprio da segunda, resultando em um campo magnético total bem grande e variável no tempo. Em outras palavras, se o primário e o secundário tiverem a mesma frequência de ressonância, teremos a chance de transmitir uma quantidade de energia considerável pelo ar.

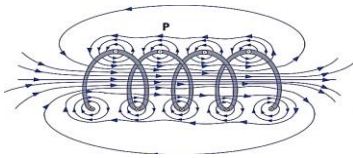
ARRANJO EXPERIMENTAL E MODELO ELETRODINÂMICO

No projeto, iremos estudar basicamente um sistema de transmissão de energia formado por duas bobinas (bobina transmissora – bobina 1, e bobina receptora – bobina 2), conforme ilustra o desenho esquemático a seguir.



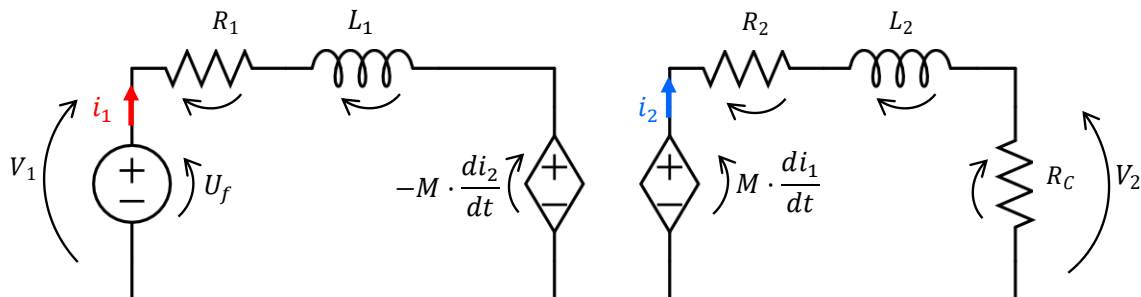
Desenho esquemático de um modelo de transmissão de energia sem fio com duas bobinas.

A ideia é utilizar uma fonte de tensão alternada (V_1), de modo a produzir um campo magnético ressonante e variável no tempo, o qual irá induzir uma diferença de potencial na bobina 2, alimentando a carga R_C . O



circuito formado por duas bobinas, uma primária e outra secundária, perpassadas em seu interior por um campo magnético comum às duas, deve ter te lembrado um sistema que já estudamos em nosso curso, não é mesmo? Se você pensou no transformador, acertou! A única diferença, além dos capacitores, é que não teremos mais o núcleo ferromagnético dentro das bobinas.

Como já modelamos o transformador usando o circuito eletrodinâmico ilustrado na figura a seguir, poderemos modelar o circuito WPT usando exatamente o mesmo modelo, porém adaptando-o às modificações necessárias.



Modelo elétrico de um transformador.

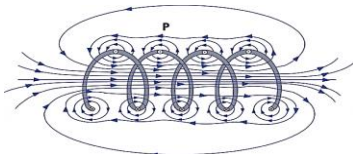
A primeira diferença entre o circuito WPT e o do transformador convencional se reflete na existência, no primeiro, de capacitores em série e em paralelo no primário e secundário, respectivamente. Como estamos pensando no funcionamento ressonante do circuito, os capacitores são necessários para garantirmos que haja frequência natural de oscilação nos circuitos primário e secundário, uma vez que indutores sozinhos não podem oscilar em uma frequência natural.

Uma importante diferença entre um transformador com núcleo de ferro e um outro sem esse núcleo (como no caso da transmissão pelo ar) é que a intensidade do campo magnético produzido pela bobina primária, por exemplo, não será igual à intensidade do campo magnético no interior da bobina secundária, hipótese que usamos para construir o modelo do transformador. Contudo, a engenharia é conhecida exatamente pela engenhosidade das soluções encontradas, não é mesmo?

Em um transformador convencional, a indutância mútua é calculada usando-se $M = \sqrt{L_1 \cdot L_2}$, sendo que a definição de indutância mútua consiste na razão entre o fluxo magnético total em uma bobina e a corrente que circula na outra. Ora, se apenas parte do fluxo magnético produzido por uma das bobinas chega à outra, nada mais simples do que considerar um “fator de acoplamento k ”, de tal modo que $M = k \cdot \sqrt{L_1 \cdot L_2}$. Esse fator de acoplamento pode variar entre 0 e 1, sendo 1 apenas quando há um núcleo de ferro entre as bobinas.

O PROJETO, SUAS ETAPAS E ATIVIDADES

O projeto será desenvolvido por grupos de quatro alunos(as) (mas também alguns trios) em duas modalidades: presencial ou remota, sendo que todos os integrantes devem optar pela mesma modalidade. Ao final do projeto, cada grupo deverá fazer uma **apresentação para toda a turma, no dia 29/11**, comunicando os resultados de simulações e apresentando um vídeo do protótipo experimental do circuito WPT (apenas para os grupos presenciais).



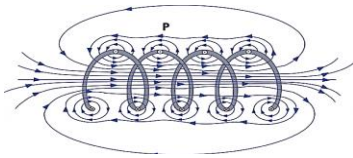
Na modalidade presencial, haverá uma competição entre todos os grupos das três turmas, da qual sairá vencedor o grupo que conseguir transmitir **mais potência a uma maior distância, além de apresentar os resultados de maneira clara, objetiva e organizada**. A escolha do grupo vencedor levará em consideração tanto o indicador potência-distância como a nota do projeto. Como prêmio, o grupo vencedor será retratado em uma matéria jornalística na nova newsletter do Insper sobre tecnologia, a **InsperTech**.

As atividades do projeto estão divididas em duas etapas, sendo a primeira composta por **simulações básicas** do modelo eletrodinâmico, em Python, a serem executadas tanto por grupos presenciais como remotos; a segunda etapa será específica para cada modalidade: para os grupos presenciais, ela consistirá em montar o circuito WPT em protoboard/PCB, medindo a potência transmitida em função da distância. Já para os grupos remotos, a segunda etapa será constituída por simulações aprofundadas, por meio das quais os grupos tirarão conclusões sobre as relações entre potência/eficiência na transmissão e a frequência e o fator de acoplamento magnético. Em resumo:

- **Etapla 1:** simulações numéricas essenciais (ambas as modalidades)
- **Etapla 2 – presencial:** montagem do circuito e medições (somente presencial)
- **Etapla 2 – remoto:** simulações numéricas aprofundadas do modelo (somente remoto)

Etapla 1 - Atividades

- 1) Elaboração do diagrama do modelo eletrodinâmico do circuito WPT: essa atividade consiste em especificar, por meio de um circuito, o modelo eletrodinâmico WPT usando abordagem fasorial. Para isso, o modelo eletrodinâmico do transformador deve ser adaptado de modo a considerar o parâmetro k e os capacitores C_1 e C_2 , lembrando que C_1 **deve estar série** com a bobina primária, e C_2 **em paralelo** com a secundária; no projeto, vamos considerar que as bobinas transmissora e receptora sejam iguais, ou seja, $L_1 = L_2$. Do mesmo modo, os capacitores também devem ser iguais ($C_1 = C_2$), de modo que a frequência de ressonância dos conjuntos LC seja a mesma no primário e secundário. Pesquise sobre como calcular a frequência de ressonância de um conjunto LC .
- 2) Código do modelo numérico: essa atividade consiste em escrever um código em Python que simule o modelo esquematizado no item anterior. O código deve usar como parâmetros os valores das indutâncias, capacitâncias e resistências das bobinas primária e secundária (neste momento, usem valores quaisquer, mas razoáveis do ponto de vista físico). Recomenda-se a utilização, como ponto de partida, do código em Python usado no laboratório 2. Documente seu código explicando cada etapa do cálculo. Para as simulações iniciais, adotem valores razoáveis para indutâncias, frequência, resistências e capacitâncias a serem utilizados.
- 3) Construção de gráficos de I_1 e I_2 em função da frequência: essa atividade consiste em fazer um gráfico dos módulos das correntes \hat{I}_1 e \hat{I}_2 em função da frequência da fonte, para um k (coeficiente de acoplamento) qualquer inicialmente fixo. A frequência para a qual as correntes são máximas é coincidente com a frequência de ressonância que vocês obtiveram na atividade 1? O que acontece com os gráficos dos módulos das correntes quando se altera o k do circuito? Documente os resultados que obtiveram, pensando em gráficos adicionais que possam esclarecer o funcionamento do circuito.



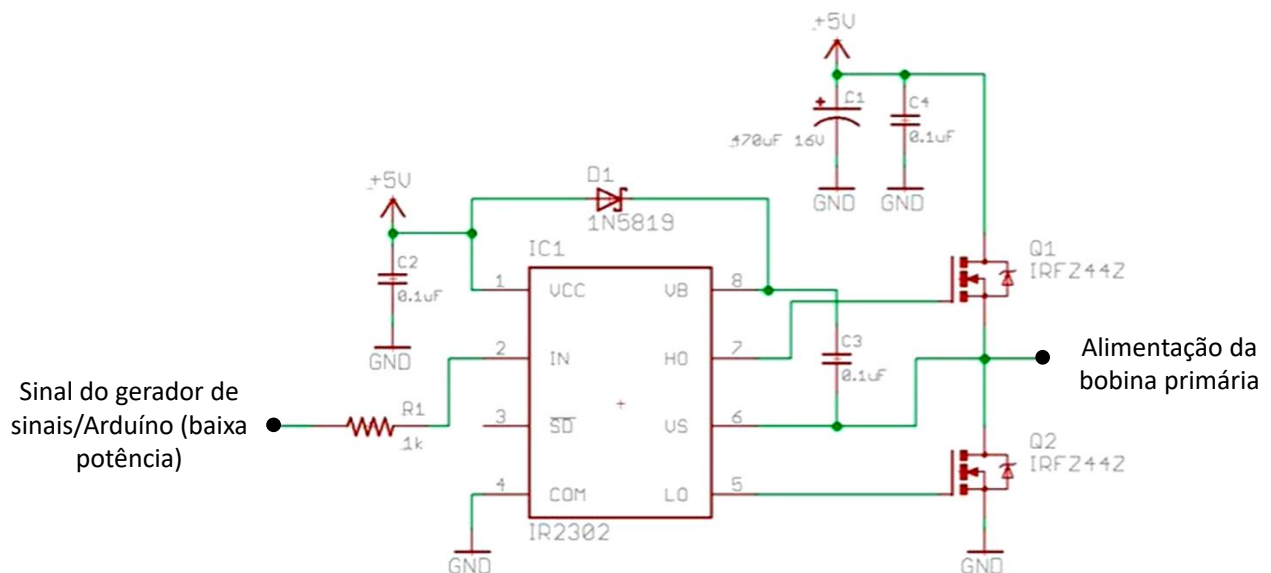
- 4) Construção de gráficos das potências e da eficiência em função da frequência: por fim, a última atividade da Etapa 1 consiste em construir gráficos das **potências reais de entrada e de saída** em função da frequência. Além desses gráficos, vocês construirão um terceiro gráfico que relacionará a eficiência (ou o ganho de potência) do seu sistema com frequência da fonte. Documente os resultados que obtiveram, pensando em gráficos adicionais que possam esclarecer o funcionamento do circuito.

Etapa 2 – Presencial – Atividades

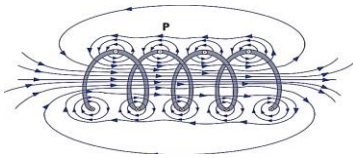
Para os grupos que farão o projeto presencialmente, as atividades da etapa 2 estão relacionadas à **implementação experimental** do circuito simulado. Os alunos do grupo devem fazer a montagem em protoboard ou PCB, validar o modelo usado na Etapa 1, obter os dados de medições e fazer um vídeo que permita verificar o funcionamento do circuito. São atividades da Etapa 2:

- 1) Montagem do circuito de alimentação do primário: pelo fato de o gerador de sinais não ter potência suficiente para alimentar a bobina primária do WPT, vamos precisar trabalhar com um circuito denominado “meia ponte” (ou *half bridge*), capaz de isolar a excitação na frequência de ressonância (circuito de controle), proveniente do gerador de sinais, da alimentação da bobina primária (circuito de potência). Observe o circuito que vamos montar na figura a seguir. Na entrada do circuito (pino 2 do IR2302) conectaremos o gerador de sinais ou o Arduino, que deve fornecer um sinal de onda quadrada na frequência de ressonância (entre 0 V e V_{cc}). O circuito integrado IR2302 controla o acionamento das chaves eletrônicas (MOSFETs), acionando-as alternadamente nos semiciclos nulo e positivo do sinal quadrado. Na montagem do circuito, é fundamental verificar o sinal de onda quadrada nos pontos de entrada e saída com o auxílio de um osciloscópio (esse sinal deve ir de 0 V a V_{cc} , sendo V_{cc} máximo igual a 15 V). Perguntem aos professores e aos técnicos do LFI sobre o funcionamento desse circuito, não deixando de fazer anotações sobre ele, principalmente compreendendo por que não é possível conectar o Arduino ou o gerador de sinais diretamente à bobina primária.

IMPORTANTE: todos os componentes para a montagem desse circuito encontram-se no LFI.



Desenho esquemático do circuito de alimentação da bobina primária.



- 2) Projeto das bobinas de transmissão e recepção: seu grupo deve projetar as bobinas que serão utilizadas no circuito. Vocês devem decidir qual o formato, raio/largura, bitola do fio e número de voltas para certa indutância pretendida, além de definirem a frequência em que pretendem transmitir energia pelo ar (devido aos limites do circuito meia ponte, vamos limitar a frequência a um máximo de 150kHz). Há inúmeros sites/artigos que fornecem equações ou permitem o cálculo aproximado da indutância de uma bobina com formato específico e com núcleo de ar. Os professores e os técnicos podem ajudar a escolher sites confiáveis ou equações já testadas em laboratório. Definidas a indutância e a frequência de operação, é possível calcular a capacitância dos capacitores C_1 e C_2 de modo a que o sistema trabalhe na frequência de ressonância pretendida.
- 3) Montagem das bobinas primária e secundária: após estimar os valores de indutância usando equações e/ou softwares, assim como os valores de frequência e dos capacitores, vocês devem construir as bobinas e medir suas indutâncias e resistências usando o medidor LCR de alta precisão que temos no laboratório (certifiquem-se que estão medindo **as indutâncias e as resistências** das bobinas na **frequência de operação do circuito de vocês**). Será necessário adaptar o projeto aos componentes existentes, o que os pode levar a refazer/ajustar as bobinas. Quando maior a frequência, maiores os valores das resistências R_1 e R_2 das bobinas devido ao “efeito pelicular” (ou *skin effect*). Pesquisem sobre esse efeito.
- 4) Atualização da simulação da Etapa 1: como agora vocês têm os parâmetros medidos das bobinas e capacitores, devem atualizar os parâmetros do modelo construído na Etapa 1. Como estamos trabalhando com uma tensão quadrada na entrada da bobina primária, precisamos fazer uma pequena alteração na amplitude da função senoidal usada na simulação. Para isso, utilize a expressão:

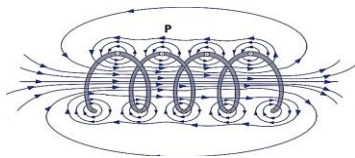
$$V_1(t) = \frac{2}{\pi} V_p \cos(\omega t)$$

Nessa expressão, V_p é a amplitude da onda quadrada (alimentação dos MOSFETs). Os professores ficarão felizes em explicar por que isso é necessário.

- 5) Montagem do circuito WPT e medição das distâncias e potências transmitidas: nessa atividade, vocês conectarão as bobinas ao circuito e iniciarão o experimento, filmando as situações experimentadas para edição final de um vídeo demonstração. Comparem a medição da tensão $V_2(t)$ àquela simulada pelo modelo. Percebam que é possível ajustar o coeficiente de acoplamento de tal modo a calibrar o modelo frente às medições. É possível construir um circuito retificador simples, com quatro diodos e um capacitor eletrolítico, a ser conectado à saída do circuito secundário - tensão $V_2(t)$ -, de modo que uma carga DC possa ser conectada ao receptor WPT.
- 6) Preparação da apresentação do projeto, a ser realizada no dia 29/11: Em 5 ou 6 slides, vocês devem explicar o circuito, o processo de construção das bobinas, as medições e validações realizadas. É muito importante que elaborem uma tabela com as medições das potências transmitidas e a que distâncias ocorreram as transmissões. Observem a tabela a seguir para orientação, a qual deve ser preenchida com um mínimo de 5 medições.

Potência real medida (W)	Distância de transmissão (cm)

Durante o tempo de apresentação, deve ser exibido um vídeo editado, mostrando o funcionamento do circuito. Considerem a confecção de um vídeo de aproximadamente 2min.



Etapa 2 – Remoto – Atividades

Para os grupos que farão o projeto remotamente, as atividades da etapa 2 estão relacionadas a simulações complementares do modelo, mais aprofundadas e que permitam concluir algo sobre o circuito WPT. Diferentemente do modelo presencial, onde todos os parâmetros podem ser medidos, na modalidade EAD alguns parâmetros deverão ser calculados. O cálculo da autoindutância e da indutância mútua entre as bobinas é de especial importância, pois permitirá que se obtenha o fator de acoplamento k para uma dada distância. Provavelmente, vocês devam estar se perguntando como calcular os valores das indutâncias e indutância mútua entre bobinas sem núcleo de ferro. Por isso, a seguir, apresentamos uma orientação para tal cálculo.

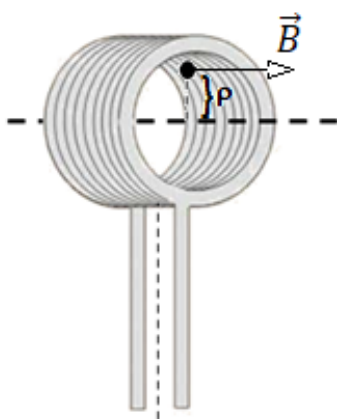
CÁLCULO DAS INDUTÂNCIAS E INDUTÂNCIAS MÚTUAS

Para obtermos o valor da autoindutância de uma bobina circular plana de N voltas, devemos conhecer o fluxo magnético total em seu interior, gerado por uma corrente i estabelecida na bobina. De posse de tal fluxo, podemos calcular a autoindutância L usando a definição:

$$L = \frac{\Phi_{B_{total}}}{i}$$

Mas, ainda há um problema: como calcular o fluxo total no interior da bobina? Sabemos que o campo magnético no centro de uma bobina circular de N voltas, gerado por uma corrente que a percorre, pode ser facilmente calculado através lei de Biot-Savart, tendo intensidade dada por $B = \frac{N\mu_0 i}{2R}$, com direção perpendicular ao plano da bobina. No entanto, esse valor não representa o campo magnético em pontos fora do centro. Se quisermos calcular o fluxo total no interior da bobina, temos que saber o valor do campo em todos os pontos de seu interior, para, então, calcularmos o fluxo total por meio da **integral de fluxo na superfície plana** interior à bobina.

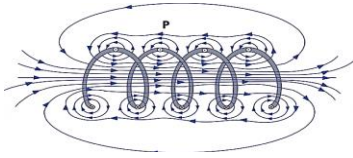
Encontrar o valor da intensidade do campo magnético num ponto qualquer no interior da bobina pode ser bastante trabalhoso, mas sua direção é conhecida: assim como o campo em seu centro, o campo em um ponto qualquer no interior da bobina tem direção normal à superfície delimitada pela bobina.



Para calcular a intensidade de B em pontos pertencentes à superfície localizada no centro da bobina, podemos utilizar a seguinte aproximação:

$$B(\rho) = N\mu_0 \frac{i}{2R} \left[e^{\left(\frac{2\sqrt{2}\rho}{R} - \pi\right)} + 1 \right] [T] \quad 0 < \rho < R$$

Nessa equação, μ_0 é a permeabilidade magnética no vácuo (muito próxima à do ar), N é o número de espiras, R é o raio da bobina e ρ é a distância do ponto ao seu centro.

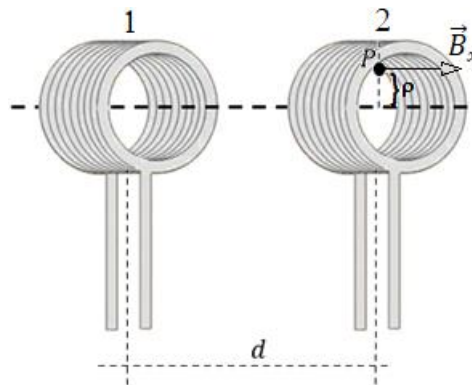


- 1) Cálculo das autoindutâncias L_1 e L_2 : utilizando a aproximação do campo fornecida, calculem as autoindutâncias das bobinas descritas nesta seção. Para isso vocês deverão, numérica ou analiticamente, integrar o campo para obter o fluxo total na superfície central da bobina. Sugestão: utilize o elemento infinitesimal de área como sendo uma coroa circular infinitesimal $dA = 2\pi\rho d\rho$.

Agora, vamos encontrar a indutância mútua entre as bobinas. Para obtermos o valor de tal indutância, precisamos conhecer o fluxo magnético total no interior de uma das bobinas, gerado por uma corrente i estabelecida na outra bobina. Por exemplo, conhecendo-se o fluxo no interior da bobina 2, gerado pela corrente na bobina 1, podemos calcular a indutância mútua usando:

$$M = \frac{\Phi_{B_{total\ em\ 2}}}{i_1}$$

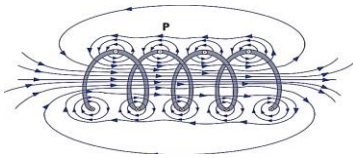
Mais uma vez, o problema é: como calcular o fluxo total no interior da bobina 2? Assim como no caso anterior, precisaremos de uma expressão aproximada para a componente axial do campo magnético gerado pela corrente i_1 em um ponto qualquer no plano formado pela bobina 2, como ilustra a figura a seguir.



Uma aproximação razoável para a componente B_x no ponto P (pertencente ao plano formado pela bobina 2 e situado a uma distância ρ do eixo central das bobinas), gerado pela corrente i_1 , é:

$$B_x(d) = \frac{N\mu_0 i_1 R^2}{2(d^2 + R^2)^{\frac{3}{2}}} \cdot \frac{d}{(d^2 + \rho^2)^{\frac{1}{2}}} \quad [T], \quad 0 < \rho < R \text{ e } d \geq R$$

- 2) Cálculo da indutância mútua M : utilizando a aproximação do campo fornecida, construam um código que calcule a indutância mútua entre as bobinas descritas nesta seção em função da distância d entre seus centros.
- 3) Gráfico de k em função da distância: por fim, utilizem a expressão $M = k \sqrt{L_1 \cdot L_2}$ para construir um gráfico do valor de k em função da distância d entre os centros das bobinas.



SIMULAÇÕES

Para as simulações solicitadas a seguir, utilize os números da tabela abaixo. Os valores em branco devem ser preenchidos com os resultados encontrados nos itens anteriores (cálculo das indutâncias).

	BOBINA 1	BOBINA 2
NÚMERO DE VOLTAS	200	200
RAIO	20cm	20cm
RESISTIVIDADE	0,025Ω/m	0,025Ω/m
AUTOINDUTÂNCIA		
INDUTÂNCIA MÚTUA		
RESISTÊNCIA TOTAL		
ALIMENTAÇÃO	15V pp	0V

Considere ainda capacitores de $10nF$ em paralelo com cada uma das bobinas.

- 4) Construção de um gráfico conclusivo de V_2 de pico em função da distância entre os centros das bobinas: nessa etapa, vocês deverão simular o modelo para 20 valores diferentes de cargas resistivas, em função da distância (d), sempre na frequência de ressonância do circuito. A ideia é interpretar o comportamento da tensão de saída V_2 em função de d para cada valor de carga. Documentem as conclusões que obtiveram nesse gráfico, as quais deverão ser explicadas na apresentação final. Lembrem-se que diferentes distâncias fornecem diferentes fatores de acoplamentos.
- 5) Construção de um gráfico conclusivo da eficiência do circuito em função da distância entre as bobinas: nessa etapa, vocês deverão fazer simulações que lhes permitam construir um gráfico da eficiência em função de d , para diferentes valores de frequência, dada uma carga fixa resistiva. Documentem as conclusões que obtiveram nesse gráfico, as quais deverão ser explicadas na apresentação final.
- 6) Construção de um gráfico conclusivo em 3D: nessa etapa, vocês devem produzir um gráfico conclusivo em 3D, relacionando a eficiência do circuito tanto à frequência quanto à distância d entre os centros das bobinas para uma carga fixa resistiva. Documentem as conclusões que obtiveram nesse gráfico, as quais deverão ser explicadas na apresentação final.
- 7) Preparação da apresentação do projeto, a ser realizada no dia 29/11: Em 5 ou 6 slides, vocês devem explicar o circuito, as simulações realizadas e os gráficos gerados. É muito importante que elaborem conclusões sobre o circuito, identificando aprimoramentos que seriam necessários para que fosse possível a construção de um circuito WPT profissional.