

# **TRANSMITINDO ENERGIA ELÉTRICA SEM FIO POR MEIO DE ACOPLAMENTO RESSONANTE PARA CARREGAR BATERIA DE DRONE**

Fernanda Luisa Batista Docampo – fernandaluisadocampo@hotmail.com

Juliana Marques De Oliveira – julismarques@hotmail.com

Edson Tafeli Carneiro dos Santos (Orientador) – edson.santos@mackenzie.br

## **RESUMO**

Os veículos aéreos não tripuláveis estão ganhando espaço no mercado nos dias atuais, sendo utilizados em diversas atividades as quais não se imaginava que poderiam ser desenvolvidas por esse tipo de robô. Este aumento no uso dos VANTS intensificou o gasto de energia das baterias e a necessidade de recarregar essas baterias. Os sistemas de transmissão sem fio de energia elétrica, surgiram como uma nova abordagem de carregamento para as baterias em diversos equipamentos móveis. Esta forma alternativa de carregamento será retratada neste trabalho como meio de recarga para os drones, com circuitos de transmissão e recepção desenvolvidos sob medida para o uso de um drone *GOAL MEGATRON X16*. No sistema receptor foi utilizado um circuito retificador e regulador de tensão de 5v. Com esta abordagem apresentamos um novo método de carregamento de baterias inspirados nos carregadores de celular sem fio, que cada dia mais vem se tornando popular na sociedade.

Palavras-chave: Transmissão de energia sem fio; Drones; Acoplamento magnético; bobinas em circuito impresso; Vants.

## **TRANSMITTING WIRELESS ELECTRIC POWER THROUGH RESONANT COUPLING TO CHARGE DRONE BATTERY**

### **ABSTRACT**

Unmanned aerial vehicle (UAV) started to be used nowadays for many activities that a few years ago no one could imagine being developed by those types of flying robots. The increasing use of the UAV intensified the spend of energy from the batteries and the needed of charging them. The wireless transmission systems of electrical energy rise as a new way to charge batteries of all types mobile equipment. This alternative form of charging mobile equipment will appear in this work as a form of charging drones, with

transmission and receiver circuits developed custom-made to specified use for the drone *GOAL MEGATRON X16*. In witch being used in a variety of applications, thereby utilizing a lot of energy from their batteries. Wireless transmission systems appear as a new charging approach for batteries, in this work being used as a means of recharging for drones. In the receiving system, a 5v rectifier and voltage regulator circuit was used.

Keywords: Wireless power transfer; Drone; Resonant magnetic coupling, PCB coils

## **1 INTRODUÇÃO**

A natureza dispõe diversas possibilidades para realização da transferência de energia, seja o meio em que essa transformação ocorre ou qual tipo de energia que será transmitida (se há ou não a transformação para outro tipo de energia). De acordo com Motta (2016) é impossível compreender o conceito de transferência de energia sem compreender o próprio conceito de tecnologia, ou seja, a partir do momento que o ser humano obteve a capacidade de entender e dominar a ciência, também foi capaz de fazer o mesmo com a tecnologia e transferência de energia.

A distribuição de energia foi uma das alavancas para o avanço da tecnologia e da civilização nos últimos 100 anos, pois sem as ferramentas criadas para a geração, transporte e distribuição de energia não poderia se imaginar a ocupação urbana da forma que conhecemos hoje, segundo Motta (2016). Dessa forma fica evidente o domínio do avanço tecnológico que adquirimos com o passar do tempo, de forma que se tornou normal o fato de termos energia disponível a qualquer momento e lugar em centros urbanos, fábricas e até em zonas rurais de difícil acesso.

O funcionamento de todos os dispositivos elétricos se deve a uma fonte de alimentação com energia disponível para uso a todo momento, por exemplo fontes alternadas (tomadas) ou fontes contínuas (baterias, capacitores, etc). Além da forma a qual a energia é disponibilizada, a alimentação de eletrônicos também varia em relação ao meio que a energia chegará ao dispositivo. Ou seja, o carregamento pode ocorrer através de um meio físico, como por metálico, ou via ar, utilizando por exemplo o mecanismo de propagação de ondas eletromagnéticas.

A Transferência de Energia Elétrica Sem Fio (TEESF), área de pesquisa a qual é voltada para o desenvolvimento de teorias e equipamentos para a transferência de energia elétrica por meios não sólidos, não é um conceito novo. O estudo e aprofundamento sobre

o tema, atualmente, se deve às teorias propostas por Maxwell (1873), o qual se baseou e formalizou as leis de Ampère, Biot-Savart e Faraday.

Para Barbosa (2018), a solução das equações de Maxwell apontavam a existência e propagação das ondas eletromagnéticas por meio de diversos meios, de forma a indicar que desde o século XIX, era possível a transmissão de energia elétrica sem a utilização de fios. A comprovação da teoria de Maxwell foi descoberta por Heinrich Hertz, após a realização de um experimento. Neste foi desenvolvido um sistema composto de bobinas que identificava as ondas transmitidas pelo ar, 15 anos depois de a descoberta de Maxwell, se tornando o primeiro a desenvolver um sistema de transmissão de energia elétrica sem fio.

Já Nikola Tesla, segundo Souza (2016), afirmou no final do século XIX que havia experimentado um raio de energia elétrica excitando átomos dentro de uma substância, impulsionando a realização de diversos experimentos baseados em seus trabalhos, criando assim uma teoria que revolucionária o mundo. Em 1893, Tesla fez demonstrações energizando remotamente lâmpadas no chão de sua estação de experimentos em Colorado Springs. Este trabalho o motivou a buscar formas eficientes de transmitir grandes quantidades de potência sem utilização de fios. O mais conhecido projeto é a *Wardenclyffer Tower*, onde se verificava a possibilidade de abastecer vilas e aldeias remotas com energia elétrica. Devido à tecnologia disponível na época e falta de recursos esse projeto nunca foi acabado e durante décadas pouco se evoluiu em pesquisas nesta área.

O fracasso do desenvolvimento da *Wardenclyffer Tower* não impediu que estudiosos aprofundassem as pesquisas sobre a transmissão sem fios via ondas radio magnéticas. A ineficiência na transmissão de energia elétrica por esse método, devido à alta taxa de dispersão, não levou ao fim dos estudos desta área, isto porque com todo o trabalho desenvolvido até então descobriu-se que essas radiações são a forma ideal para transmitir dados sem um meio construído por condutores, de acordo com Mendes (2009).

A aplicação prática desse tipo de tecnologia foi implementada pelos mercados de telefonia, possibilitando, por exemplo, a criação e desenvolvimento de telefones celulares, e posteriormente da internet sem fio, os quais tornaram-se catalisadores para o desenvolvimento de inúmeras outras aplicações tecnológicas. Por meio destas, foi possível promover posteriormente o estudo e desenvolvimento de teorias para implementação em protótipos para a transmissão de energia sem fios.

Conforme afirmado por Godim (2010), em 1975 o professor Don Otto desenvolveu, na Universidade de Auckland, Nova Zelândia, uma máquina que funcionava a partir da energia transmitida por indução elétrica. Nesta mesma universidade, em 1988, a equipe do professor John Boys desenvolveu um projeto utilizando a indução elétrica, patenteando o experimento. Esse projeto foi recentemente retomado pela equipe de pesquisadores da Intel. Atualmente, o modelo de sistema de ônibus a energia elétrica desenvolvido na Universidade de Auckland é utilizado no fornecimento de energia para uma linha de ônibus comercial, em *Whakarewarewa*, também na Nova Zelândia. Este sistema baseia-se novamente na transmissão de energia por indutância, IPT (*Inductive Power Transfer*).

Segundo Jorge (2012), o National Renewable Energy Laboratory publicou em 2003 um relatório em que descreveu um novo processo em investigação pela empresa ITN Energy Systems a partir do estado da arte, baseando-se na associação de dois elementos, uma antena óptica de elevada eficiência e um sistema de retificação formado por diodos de comutação muito rápida constituídos por Metal-Isolante-Metal (MIM).

Recentemente um grupo de investigadores do Massachusetts Institute of Technology (MIT) propôs um novo esquema baseado em ressonâncias magnéticas fortemente acopladas. Para Araújo (2015), representou um grande avanço para a transferência de potência a distâncias intermédias (de 1 a 2 m), pois demonstrou que a transferência de energia implementada desta maneira pode ser omnidirecional e eficiente com pequenas interferências e baixas perdas em objetos ambientais, independentemente da geometria do espaço circundante do sistema.

Comunicações sem fios são uma realidade presente na sociedade contemporânea. Para Souza (2016), a maioria das aplicações elétricas e eletrônicas a transferência de energia elétrica é realizada por meio de transformadores, projetados com o objetivo de apresentar características o mais próximo possível das ideais, isto é, elevado fator de acoplamento, baixa dispersão e perdas resistivas e magnéticas reduzidas. Nestas aplicações, apesar do isolamento galvânico entre os enrolamentos primário e secundário, estes se encontram conectados mecanicamente pelo núcleo ferromagnético do transformador. Há aplicações onde seria desejável que os enrolamentos do transformador pudessem estar fisicamente separados por uma distância que pode ser significativa quando comparada com as dimensões do núcleo do transformador. Tais aplicações são designadas sistemas de Transmissão de Energia Elétrica Sem Fios.

Conforme Souza (2016) no nosso cotidiano a energia é fundamental para inúmeras atividades que realizamos, principalmente as que exigem mobilidade. Há vários dispositivos autônomos cujo a mobilidade está limitada a reposição de carga utilizando cabos para a transmissão de energia.

De acordo com Motta (2016), o contato do consumidor comum com tecnologia de mobilidade ajudou a impulsionar a necessidade de desenvolver alternativas que minimizem a necessidade de uso de cabos e fios no nosso cotidiano. Assim muitas empresas surgiram nos últimos anos com foco unicamente no projeto de protótipos e produtos voltados para TEESF, não só com foco ao consumidor comum, mas a diversos setores, desde a indústria civil e militar até a área médica.

Como ressaltado por Godin (2010) as diversas experiências bem sucedidas fundamentadas no campo de *Witricity*, possibilitaram o maior domínio da teoria envolvida para o desenvolvimento tecnológico obtido atualmente, aplicando-se em áreas que se referem a alimentação a distância de veículos espaciais, na transmissão de energia produzida no espaço para a Terra, na alimentação de cidades ou regiões geograficamente isoladas, na alimentação de alto-falantes, no carregamento de aparelhos celulares, entre outras aplicações que já podem ser estudadas e outras que nem imaginamos com a atual situação tecnológica. O visado futuro sem um intermédio de fios, sem conexão em tomadas ou qualquer outro meio físico para realizar o carregamento de baterias de equipamentos portáteis, como telefones, computadores, leitores portáteis entre outros, está cada vez mais próxima da realidade

De acordo com Ramos (2013) conhecer as possibilidades, as limitações, as potencialidades que as soluções desenvolvidas em relação a TEESF têm para oferecer, tem interesse tanto do ponto de vista tecnológico como do ponto de vista empresarial.

## **2 METODOLOGIA**

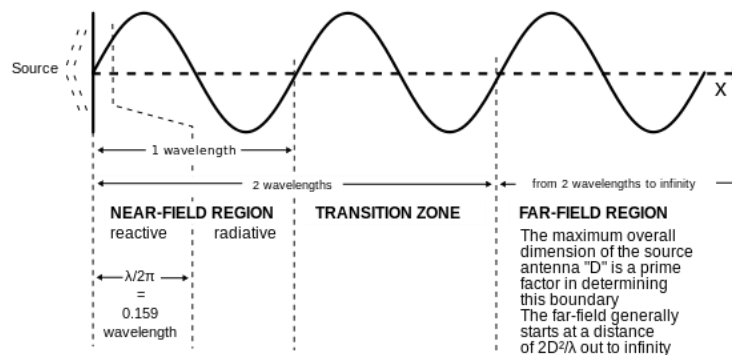
Segundo Motta (2016), existem diversos métodos de transmissão de energia sem-fio, mas os principais são realizados por meio de um mesmo fenômeno físico, os campos eletromagnéticos. O alcance da transmissão pode ser diferenciado a partir da irradiação do campo eletromagnético, ou seja, proximidade ou distância.

Para a transmissão de campos próximos (*near-field*) a transmissão de energia é feita por meio da indução de campos variáveis no tempo sendo este fenômeno descrito pelas equações de Maxwell. Já para a transmissão em campos distantes (*far-field*) a

energia é preferencialmente propagada por meio de ondas eletromagnéticas, podendo promover não apenas a transferência de energia como também de informação.

Desta forma a distinção do alcance e diferentes possibilidades de aplicações são as bases que regem estes fenômenos. Neste caso a transferência de energia entre um ponto receptor a um ponto transmissor.

Figura 1 – Exemplificação do das zonas de *Far-Field* e *Near-Field*

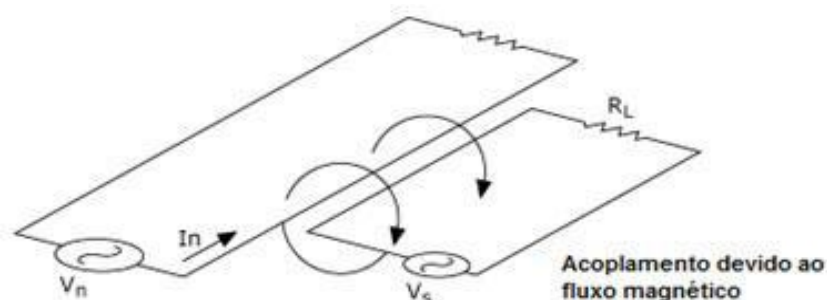


Fonte: (FERNANDES, 2015)

## 2.1 ACOPLAMENTO INDUTIVO

A tecnologia baseada na indução eletromagnética consiste na base teórica do funcionamento dos transformadores, ou teoria dos acoplamentos, é considerada a mais simples para transferência de energia. A partir da Lei de Faraday, como mostra a equação  $V = N \frac{d\Phi}{dt}$ , a corrente AC em um enrolamento gera um campo magnético variável no tempo, cujo fluxo atravessa um núcleo magnético e induz uma força eletromotriz em um ou mais enrolamentos sobre esse núcleo. (Sathler, 2013). Por essa razão, na maioria dos sistemas se faz necessária a presença de um oscilador, que, a partir de uma fonte de alimentação, produz correntes de alta frequência.

Figura 2 - Representação do Acoplamento Indutivo



Fonte: (FERNANDES, 2015)

De acordo com a teoria dos transformadores, as características de tensão e corrente das bobinas de transmissão e recepção ideal é descrita pela seguinte equação

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} = j * \omega * \begin{bmatrix} L_1 & M_{12} \\ M_{21} & L_2 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix}$$

Em links indutivos de duas bobinas, a eficiência energética da transmissão e potência transferida são proporcionais ao quadrado do coeficiente de acoplamento, que é calculado por meio da fórmula  $K = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}}$ , e por sua vez o coeficiente de acoplamento  $k$  decresce com a distância entre as bobinas. Como indicado por Godim (2010), a frequência de ressonância pode ser definida como a frequência natural que permite transferência máxima de energia a um sistema oscilante. A ressonância em um sistema composto por dois indutores ocorre quando a frequência natural de oscilação do campo magnético das mesmas é idêntica.

Assim, nota-se que a eficiência de transmissão decresce rapidamente com o aumento da distância, tornando o método do acoplamento indutivo para transmissão sem-fio restrito a aplicações de curta distância para bobinas sem núcleo, ou seja, com o ar como meio de separação, o coeficiente de acoplamento, em geral, chegando ao valor máximo de 0.7 para distância muito curtas (menor que 5cm) entre bobinas alinhadas. Dessa forma, as bobinas necessitam estar muito próximas para maximizar o acoplamento e a eficiência de transmissão.

## 2.2 ACOPLAMENTO RESSONANTE

O método de acoplamento indutivo ressonante é uma forma melhorada do método de acoplamento indutivo. A tecnologia para transmissão de energia elétrica baseada em bobinas ressonantes acopladas emprega um sistema físico constituído por conjuntos bobina-capacitor formando circuitos auto ressonante. Uma das bobinas, denominada unidade de emissão, é ligada à fonte de energia, e a outra, denominada unidade de recepção, é conectada ao circuito a ser alimentado.

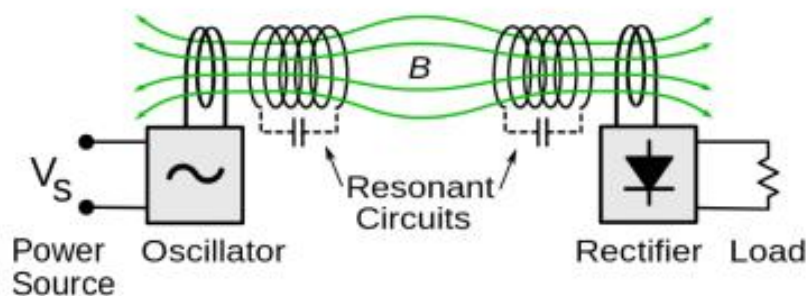
O circuito ressonante combina elementos resistivos, indutivos e capacitivos (ou seja, um circuito RLC), e é, fundamental para que diversos dispositivos elétricos e eletrônicos funcionem, sendo que sua característica principal é que a sua resposta em frequência possui valor máximo para uma frequência  $f_s$ . (Chaubet, 2019). E para chegar

nesta frequência, as reatâncias indutivas e capacitivas devem ser iguais para se anularem, tornando o circuito equivalente puramente real., no entanto, o circuito é considerado em estado de ressonância quando sua resposta está próxima do valor máximo.

Os circuitos podem estar em série ou em paralelo e possuem equações diferentes para o cálculo da frequência de ressonância, como mostrado através das equações  $f_s = 1/2\pi\sqrt{LC}$  e  $f_p = f_s \sqrt{1 - \frac{R^2 C}{L}}$ .

A frequência de ressonância desses circuitos é dada pelo produto da indutância pela capacitância dos elementos LC que os constituem. Ao invés de irradiar ondas eletromagnéticas para o ambiente, a unidade emissora preenche o espaço em torno dela com um campo magnético não-irradiante que oscila com frequência da ordem de alguns Mega-hertz. O campo não-irradiante troca energia com uma ou mais unidades receptoras que são projetadas especialmente para estarem em ressonância com o campo gerado. Se as bobinas ressonantes estiverem suficientemente próximas entre si (região de campo próximo), “feixes de energia” se movem da unidade emissora para a unidade receptora. Nenhuma troca de energia é realizada com objetos que operem com frequências de ressonância diferentes da unidade emissora.

Figura 3 – Bobinas Ressonantes



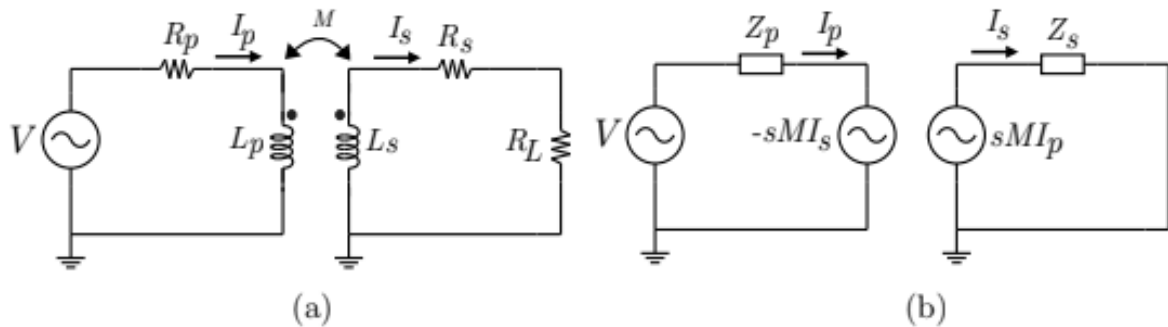
Fonte: (MOTTA, 2016)

Processos baseados na Teoria do Modo Acoplado têm despertado bastante interesse por serem eficientes e simples, requerendo basicamente fios de cobre para confecção das bobinas e um amplificador de potência capaz de gerar sinais na faixa da frequência de ressonância do sistema. Embora atualmente algumas empresas já estejam iniciando o desenvolvimento de produtos utilizando a transferência de energia sem fio



por meio de bobinas acopladas em ressonância, muitos aspectos científicos devem ainda ser explorados, compreendidos e divulgados (BARBOSA, 2018).

Figura 4 – Circuitos acoplados (a) domínio do tempo (b) domínio da frequência

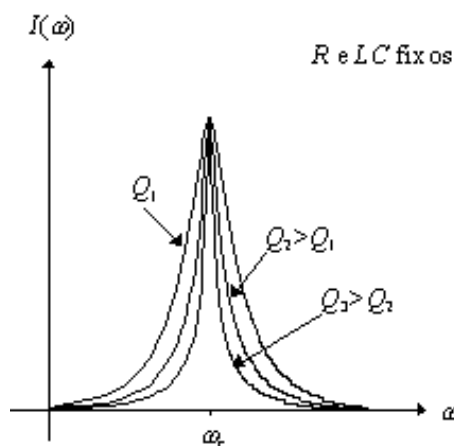


Fonte: (BARBOSA, 2018)

### 2.3 SELETOR DE QUALIDADE

Os circuitos, em condições ideais, deveriam apresentar apenas uma resposta em frequência já definida rejeitando as demais, entretanto estes circuitos apresentam em sua curva de resposta variações mais agudas devido as resistências parasitas. Assim para analisarmos a qualidade do circuito é necessário realizar o cálculo deste fator de qualidade  $Q$ .

Figura 5 – Resposta de um circuito de sintonia LC



Fonte: Adaptado de <https://www.newtoncbraga.com.br/index.php/telecom/6297-tel095>

Como mostra a figura acima, quanto maior a o valor de  $Q$ , ou seja, quanto maior a seletividade a resposta em frequência maior é a capacidade do circuito se separar frequências principal das frequências parasitas.

Tabela 1 – Fator de Qualidade de acordo com o circuito

	RLC-SÉRIE	RLC-PARALELO (ideal)	RLC-PARALELO (real)
<b>FACTOR QUALIDADE (Q)</b>	$\frac{\omega_r * L}{R} = \frac{1}{\omega_r * R * C}$	$\frac{R}{\omega_r * L} = \omega_r * R * C$	$\frac{R_{leq} // R_s}{X_{leq}} \approx Q_L$

Em bons condutores, conforme uma onda eletromagnética se propaga, ela tende a se restringir à superfície do meio, fenômeno conhecido como efeito pelicular, do inglês skin effect. Pode-se então medir a profundidade de penetração pelicular  $\delta$  (em metros, m) em um material condutor, onde  $\mu$  é a sua permeabilidade (em Henries por metro, H/m) e  $\sigma$  é a sua condutividade (em Siemens por metro, S/m). Portanto, para um mesmo material, quanto maior for a frequência do sinal, menor será a sua profundidade pelicular. (SADIKU, 2008)

Este trabalho é pautado por meio de do método de pesquisa bibliográfica e avaliar aspectos gerais do modelo do sistema de acoplamento do transmissor sem fio para identificar os parâmetros determinantes na qualidade do acoplamento para a transmissão da energia. Ao longo dele será observado os estágios da composição de malhas ressonantes do tipo RLC.

Para a elaboração do sistema de transmissão e recepção será elaborado um circuito RLC em paralelo. A fonte energia do transmissor será a partir de rede elétrica que ficará conectada ao circuito na zona base de pouso do drone.

Para definição da área de pouso deverá ser considerado as variáveis: dimensões do drone de modelo *Goal Pro Megatron HD X16* e margem de erro de pouso considerando o dobro de sua área, ou seja, a área do transmissor estará contida em 0,05725 m<sup>2</sup>.

Tabela 2 - Especificações técnicas do sistema de bateria do Goal Pro Megatron HD X16

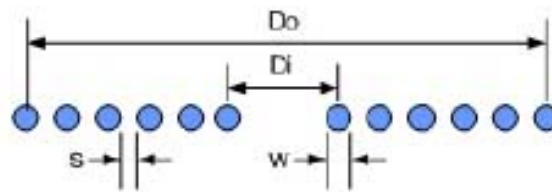
<b>Capacidade</b>	<b>850 mAh</b>
<b>Vtagem</b>	3,7 V
<b>Tipo de bateria</b>	LiPo 1S
<b>Energia</b>	3,11Wh
<b>Peso</b>	20 g

<b>Temperatura</b>	41° to 104°F (5° to 40°C)
<b>Máxima Potência</b>	80 W
<b>Altura Bateria em relação ao solo</b>	0,055 m
<b>Área da base do drone</b>	0,01431 m <sup>2</sup>

Fonte: Autores

Para o dimensionamento das bobinas de transmissão e recepção foi utilizado a calculadora disponibilizada pelo *Tesla Institute* (2019). Nela foi inserido os seguintes parâmetros: a largura da espira (em polegadas, in)[W], a distância entre espiras (em polegadas, in)[S], o diâmetro interno da bobina (em polegadas, in)[Di] e o diâmetro externo da bobina (em polegadas, in)[Do]. Observa-se que Di e Do são medidos a partir do centro da espira conforme imagem abaixo.

Figura 6 – Tesla Institute – Parâmetros Bobina



Fonte: (Tesla Institute, 2019)

Os desenhos das bobinas para confecção em Placa de Circuito Impresso (PCB, do inglês Printed Circuit Board) foram realizados no programa Eagle da Autodesk, com uso de um dos Programas de Linguagem de Usuário (ULP, do inglês User Language Programs), chamado de spiral-coil, do inglês bobina espiral. Na figura abaixo pode-se observar a tela da ferramenta e as posições escolhidas, sendo que o número de espiras da bobina, a espessura da espira w, a distância entre as espiras d, o diâmetro da malha de contato dos furos, o diâmetro dos furos, a camada na qual o desenho deve ser realizado, e a posição nas coordenadas X e Y do centro da espiral, representam as medidas selecionadas.

Para o dimensionamento da indutância das bobinas transmissora e indutora montamos os circuitos, modificando os componentes e o fator de acoplamento de acordo com nossa necessidade, ou seja, na bateria conectada ao circuito receptor, carga representada pelo resistor de  $4.3\Omega$  no circuito, deverá chegar aproximadamente a 5V e 1A, que são valores disponibilizados por carregadores comuns com fio.

Modificando a indutância das bobinas de ambos circuitos ocorreu a maior mudança nos valores de tensão e voltagem. Diminuindo o fator de acoplamento para 0.1 observamos que a melhor configuração é com a bobina transmissora com indutância 1uH e a bobina do receptor com indutância 1mH. Se deixarmos nessa configuração de circuito e aumentarmos o fator de acoplamento o programa apresenta uma mensagem de erro! Quando modificamos os capacitores e resistores, não ocorre nenhuma mudança significativa e quando modificamos a frequência da fonte, resistores e capacitores de acordo com a fórmula  $f = \frac{0.33}{RC}$  ocorre uma queda brusca da corrente e tensão da carga.

Finalizada a etapa de elaboração e aplicação do protótipo virtual, realizamos a montagem do circuito físico.

Primeiramente realizamos elaboração das bobinas através dos cálculos abaixo, utilizando a calculadora de bobinas planares disponibilizada pelo Tesla Institute. Foram criadas três bobinas, uma para a transmissão (figura 7), uma intermediária que pode ser utilizada como transmissora ou receptora (figura 8) e uma bobina receptora (figura 9).

Na bobina transmissora foi utilizado o  $D_i = 38$  mm por este apresentar um maior fator qualidade, garantindo mais diretividade para a propagação deste sinal. Conforme apresentado por Chaubet (2019).

Figura 7 – Parâmetros da Bobina Transmissora a partir da calculadora de tesla

O diagrama mostra uma bobina com diâmetro interno  $D_i$  e diâmetro externo  $D_o$ . O espaçamento entre as espiras é  $s$  e o diâmetro do fio é  $w$ .

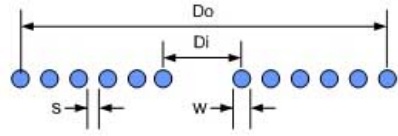
Coil inner diameter (Di):	<input type="text" value="38"/>	mm
Number of turns (N):	<input type="text" value="7.5"/>	
Wire Diameter (w):	<input type="text" value="8"/>	mm
Spacing between turns (s):	<input type="text" value="0.5"/>	mm
Inductance (L):	<input type="text" value="5.172"/>	uH
Outer diameter (Dout):	<input type="text" value="165.499"/>	mm
Wire lenght (Wl):	<input type="text" value="2.397"/>	m

Buttons: Calculate, Clear

Fonte: Autores

Na bobina R02 foi calculado um tamanho intermediário entre a bobina transmissora e receptora para que durante a validação de qual seria o fator de qualidade mais adequado para esta aplicação, assim esta bobina poderia ser utilizada tanto na transmissão quanto na recepção.

Figura 8 – Parâmetros da Bobina R02 a partir da calculadora de tesla



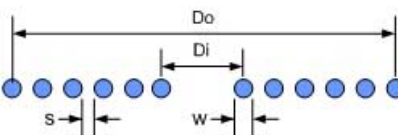
Coil inner diameter (Di):	<input type="text" value="12"/>	mm
Number of turns (N):	<input type="text" value="8"/>	
Wire Diameter (w):	<input type="text" value="6"/>	mm
Spacing between turns (s):	<input type="text" value="0.5"/>	mm
Inductance (L):	<input type="text" value="3.116"/>	uH
Outer diameter (Dout):	<input type="text" value="115.999"/>	mm
Wire length (WL):	<input type="text" value="1.608"/>	m

Calculate Clear

Fonte: Autores

Na bobina receptora foi calculado um tamanho de diâmetro que encaixa na parte inferior do drone e o número de volta e diâmetro interno para fosse obtido um fator de qualidade entre 3 a 100Khz.

Figura 9 – Parâmetros da Bobina Receptora a partir da calculadora de tesla



Coil inner diameter (Di):	<input type="text" value="6"/>	mm
Number of turns (N):	<input type="text" value="6"/>	
Wire Diameter (w):	<input type="text" value="3"/>	mm
Spacing between turns (s):	<input type="text" value="0.5"/>	mm
Inductance (L):	<input type="text" value="0.761"/>	uH
Outer diameter (Dout):	<input type="text" value="47.999"/>	mm
Wire length (WL):	<input type="text" value="0.508"/>	m

Calculate Clear

Fonte: Autores

Foram então fabricados exemplares das bobinas propostas acima, utilizando a ferramenta ULP *spiral-coil eagle* e impressão em PCB.

Figura 10 – Boninas no Board no eagle, transmissora, R02 e receptora, respectivamente



Fonte: Autores

A impressão das bobinas planares foram realizadas através das placas PCI de fibra de fibra pois estas apresentam menores capacitâncias, em caso de queima por curto não se transforma em condutor, melhor aderência entre o cobre e a fibra.

Após a impressão das placas foram realizadas as medições junto ao aparelho LCR Meter MX-1050 da Minipa para se obter a impedância e os fatores de qualidades das bobinas práticos. Obtendo os resultados indicados a seguir.

Figura 11 – LCR Meter indicando a medidas de indutâncias das bobinas planares transmissora, R02 e receptora, respectivamente.



Fonte: Autores

Após as medidas das bobinas, foi então possível gerar a tabela 3 indicando o quando de erro de indutância em relação ao valor prático comparado ao valor teórico calculado através da calculadora do instituto tesla.

Tabela 3 – Comparação de valores teóricos e práticos das bobinas confeccionadas

	Teórico	Medido	Erro (%)
<b>Transmissora</b>	5,1	5,7	10
<b>R02</b>	3,1	4,4	30
<b>Receptora</b>	0,8	1,5	47

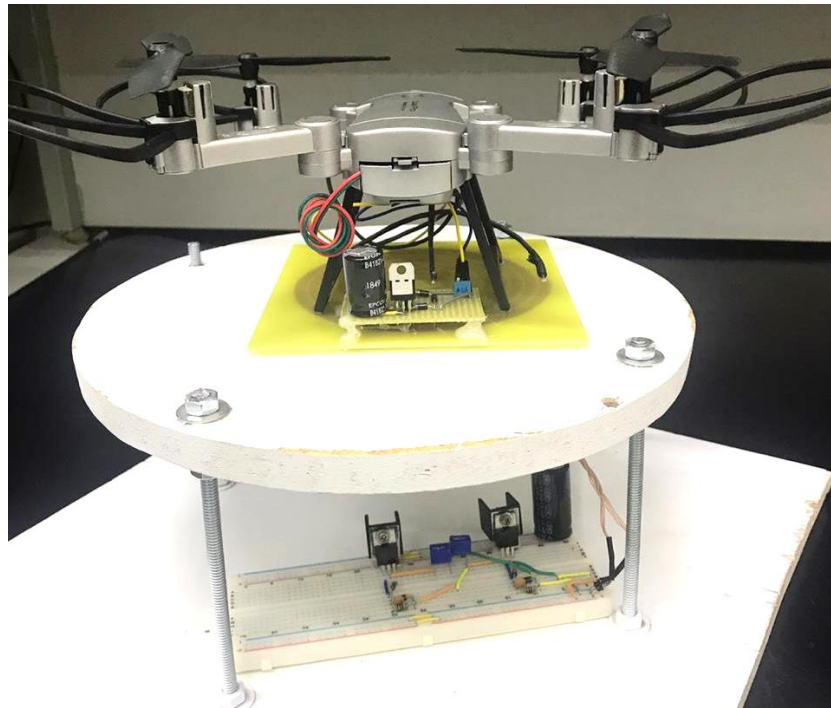
Posteriormente, começamos a montagem dos circuitos transmissor e receptor em protoboard.

Foram montadas duas versões de circuitos transmissores. Um utilizando o sistema Royer para o circuito de potência e outro utilizando o oscilador ICL8038.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Com a elaboração dos circuitos transmissores e o circuito receptor, foi realizada a integração das combinações possíveis dos sistemas para avaliar quando teria melhor eficiência para o carregamento da bateria do drone.

Figura 12 – Bobina receptora acoplada ao drone



Fonte: Autores

#### 5.1 COMBINAÇÃO 01: CIRCUITO TRANSMISSOR IC8038 - BOBINA TRANSMISSORA E RECEPTORA

Nesta configuração, o sinal gerado pelo circuito transmissor era de 10KHz e tensão de aproximadamente 3V, a saída do IC8038 para a sistema de potência do circuito era de 0,2V resultando no não funcionamento do circuito receptor. Já que para o circuito de recepção emitir um sinal na saída para carregar a bateria do drone de 3,7V era

necessário receber na bobina receptora uma tensão acima de 5V para que o regulador de tensão ajuste essa tensão de saída.

## 5.2 COMBINAÇÃO 02: CIRCUITO TRANSMISSOR IC8038 - BOBINA R02 E RECEPTORA

Esta configuração apresentou o mesmo funcionamento da combinação 01, ou seja, o circuito receptor não funcionou adequadamente pois o circuito transmissor estava emitindo uma tensão abaixo de 5V.

## 5.3 COMBINAÇÃO 03: CIRCUITO TRANSMISSOR ROYER - BOBINA TRANSMISSORA E RECEPTORA

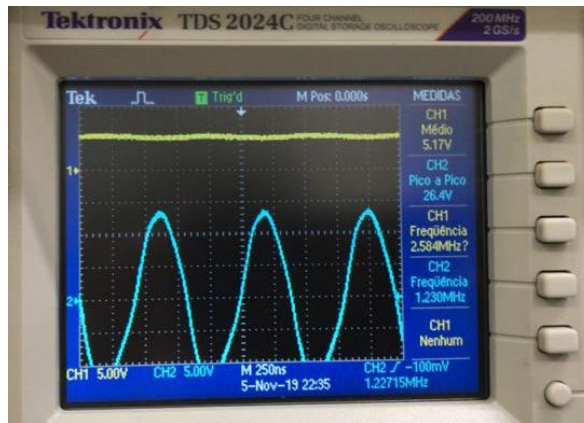
Para esta combinação, obtivemos o resultado do circuito transmissor emitindo uma tensão de aproximadamente 30V em uma frequência de 1Mhz. O circuito receptor entanto não consegue retificar o sinal, pois mesmo com a transmissão em alta frequência e voltagem, a bobina receptora tem um fator de qualidade elevado para esta frequência fazendo assim que seja necessário o alinhamento preciso para que ocorra o casamento de impedâncias e seja possível o recebimento deste sinal.

## 5.4 COMBINAÇÃO 04: CIRCUITO TRANSMISSOR ROYER - BOBINA TRANSMISSORA E R02

Com esta combinação obtivemos, a uma distância de 1,5cm, considerando apenas a distância da espessura da estrutura de pouso para o drone, a transmissão de energia foi realizada a uma frequência de 1MHz gerada pelo circuito transmissor do tipo Royer com tensão de 30V. O circuito receptor ao receber este sinal o filtra e gera um sinal DC com tensão de saída para a bateria do drone de aproximadamente 5V.



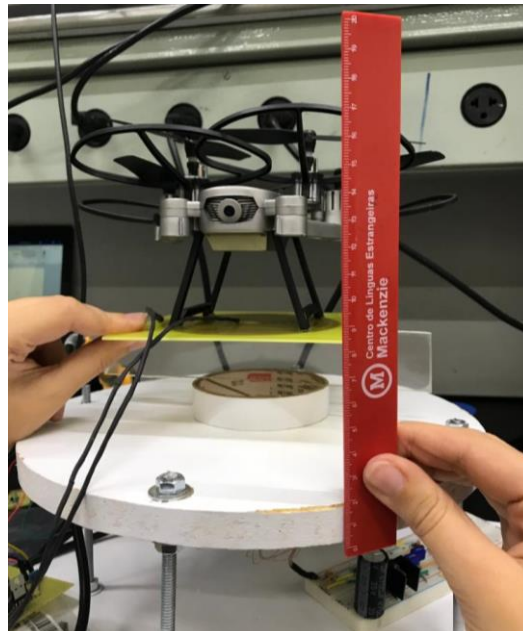
Figura 13 – Tela do osciloscópio mostrando o sinal transmitido (azul) e o sinal recebido (amarelo)



Fonte: Autores

Com este circuito estabilizado a 1,5 cm, foi variado a altura do drone e obtivemos o resultado máximo para o carregamento da bateria do drone a uma altura de 6 cm conseguindo assim uma tensão de 3,5V. Com uma distância maior que 6 cm foi obtido valores menores do que o necessário para o carregamento da bateria. Nesta condição é possível carregar a bateria do drone ainda sem realizar o pouso do mesmo.

Figura 14 – Drone levitando sobre a estrutura de pouso indicando a altura máxima para o carregamento



Fonte: Autores

Tabela 4 – Comparação entre tensões em relação a distância

Distância(cm)	Transmissor (VPP)	Transmissor (VRMS)	R02 (VPP)	R02 (VRMS)	Carga (VDC)
1,5	30	10,1	10,2	3,5	5,0
2,0	30	10,1	8,2	2,5	5,0
2,5	30	10,1	7,2	2,1	5,0
3,0	30	10,1	6,8	2,0	5,0
3,5	30	10,1	6,0	1,6	5,0
4,0	30	10,1	5,4	1,5	5,0
4,5	30	10,1	4,2	1,2	5,0
5,0	30	10,1	4,2	1,0	4,3
5,5	30	10,1	4,0	0,9	3,9
6,0	30	10,1	3,2	0,7	3,5
6,5	30	10,1	2,8	0,6	3,2
7,0	30	10,1	2,6	0,5	3,0
7,5	30	10,1	2,4	0,5	2,8
8,0	30	10,1	2,2	0,4	2,4

#### 4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir de medições realizadas, com os três *LCR Meter* disponíveis, foi observado que quanto menor o tamanho do diâmetro da bobina maior era o erro do valor teórico em comparação do valor prático da indutância das bobinas, além de necessitar uma precisão de posicionamento para melhor resposta no acoplamento das bobinas.

Constatou-se que é possível realizar a transferência de energia sem um meio condutor para carregar a bateria de um drone de 3,7V e 850mAH a uma distância de até 6 cm utilizando as bobinas planares e circuitos desenvolvidas. A esta distância a tensão obtida na carga foi de aproximadamente 4V, sendo o suficiente para a aplicação em questão e é possível obter até 5V, quando o Drone estiver pousado na plataforma com uma distância de 1,5 cm entre as bobinas. De forma análoga, a tensão que alcançará a bateria é variável ao movimentar o drone entre o intervalo de 1,5 a 6 cm, possibilitando novos estudos para mais aplicações.

Foram apresentadas diferentes propostas de configurações, podendo ser alternada a combinação entre os dois circuitos transmissores e as variações entre as três bobinas. Ao utiliza a bobina receptora e a R02, não obtivemos sinal na carga devido ao erro gerado entre o valor teórico da indutância e a real da bobina prototipada. Visto isso, optou-se pela utilização da R02 como receptora e a transmissora permitindo mensurar e atingir o objetivo do trabalho.

Para o circuito oscilador utilizando o IC 8038, observou-se que esta aplicação não apresentou a potência necessária para que seja possível a transmissão de energia entre as bobinas, pois apesar da configuração desse circuito integrado apresentar uma oscilação estável trabalha apenas com baixa tensão, tornando assim o circuito de potência para amplificar este sinal mais complexo, assim descrito neste trabalho. Além do fato deste componente ter se tornado obsoleto, inviabilizando uma produção significativa de produtos, caso o circuito em questão tivesse atingido um resultado satisfatório, devido a não fabricação do componente atualmente.

A opção mais adequada, que foi estudada e justificada neste trabalho, para esta aplicação em relação ao circuito transmissor, foi o oscilador de Royer cujo sinal gerado apresentou um ganho de tensão capaz de realizar a transmissão de energia por um meio sem fios e possibilitando carregamento da bateria, inclusive promovendo um intervalo de trabalho maior do que o necessário, possibilitando mais estudos e aplicações na mesma ou em outras áreas.

Para se obter uma cobertura abrangente da área de recepção observou-se que o fator de qualidade mais indicado é aquele que esta entra 4 a 6, em frequências de 100kHz e distancias até 6 cm para esta aplicação.

Conforme visto neste trabalho, recomenda-se a utilização de uma bobina transmissora emitindo a tensão seis vezes maior que a necessária na saída do circuito receptor, para o melhor funcionamento do sistema em aplicações similares ao apresentado. É necessário, em trabalhos futuros, o estudo mais aprofundado de um circuito oscilador para que apresente uma alta eficiência, transmitindo maiores correntes para diminuição do tempo de carregamento da bateria a ser utilizada em cada situação.

## REFERÊNCIAS

- ARAUJO, Sergio Tiago Silva. **Transferência de potência sem fios**. Coimbra, 2015.
- BARBOSA, Celton Ribeiro. **Estudo De Sistemas De Transferência Indutiva De Potência Para Recarga De Baterias**. São Paulo, 2018.
- CHAUBET, Allan Seiti Sassaqui. **Sistema De Transferência De Energia Sem Fio**. São Paulo, 2019.
- FERNANDES. Rodolfo Castanho. **Elementos Magnéticos Fracamente Acoplados para Aplicação em Transferência Indutiva de Potência: Procedimento e Critérios de Projetos, Análise de sensibilidade e Condições de Bifurcação**. São Carlos, 2015.

GONDIM, Felipe Pontes. **Transmissão De Energia Elétrica Sem Fio**. Fortaleza, 2010.

JORGE, Luis Filipe Romba. **Sistema de Transmissão de Energia Elétrica sem utilização de cabos nem meios ferromagnéticos**. Lisboa, 2012.

MOTTA, Tiago Silva. **Transmissão De Energia Sem-Fio: Método De Acoplamento Indutivo Ressonante**. Porto alegre, 2016.

RAMOS, André Pires. **Sistemas Sem Fios Para Carga De Baterias**. Aveiro, 2013.

SADIKU, Matthew N. O. **Elementos de eletromagnetismo**. Porto Alegre: Bookman, 2008.

SATHLER, Hans Hoffman. **Modeling Of Wireless Power Transmission**. Pirenópolis, 2013.

SOUZA, Wanberton. **Análise Experimental Da Transmissão De Energia Sem Fios Por Modos Ressonantes**. Uberlândia, 2016.

TESLA INSTITUTE. **Flat spiral coil inductor calculator**. Disponível em: <<http://www.tesla-institute.com!/app/sim/fscic.php>>. Acesso em: 20 out. 2019.

#### AGRADECIMENTOS

Agradecemos a Deus por todo a bondade e piedade que tem por nós.

Aos nossos Familiares por seu apoio e benevolência em toda a nossa trajetória até aqui.

Ao nosso colega Allan Chaubet, por nos apoiar e disponibilizar a sua pesquisa, na qual foi essencial para conclusão deste trabalho.

Ao Prof. Dr. Ricardo Janes que compartilhou conosco o seu espaço e conhecimento que possibilitou o desenvolvimento deste trabalho.

Ao Luciano que sempre se disponibilizou a nos ajudar nas solicitações de componentes e equipamentos do laboratório da Engenharia Elétrica Mackenzie e pacientemente nos aguardou finalizarmos o dia no último horário.

Ao nosso orientador Prof. Dr. Edson Tafeli que sempre esteve conosco e acreditou no nosso potencial.