

# **SISTEMA DE TRANSFERÊNCIA DE ENERGIA SEM FIO**

Allan Seiti Sassaqui Chaubet – allanchaubet@gmail.com

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

## **RESUMO**

Os sistemas de transferência de energia sem fio baseiam-se no acoplamento magnético de bobinas e permitem que diversos dispositivos sejam alimentados sem o uso de cabos. Após estudar alguns trabalhos realizados na área e conceitos teóricos que influenciam estes sistemas, como o efeito da ressonância, a indução magnética e o efeito pelicular, foi possível desenvolver o protótipo completo apresentado neste trabalho. O sistema apresentado neste trabalho é composto por um oscilador simples, responsável por gerar um sinal alternado a partir de uma fonte de alimentação de corrente contínua, que alimenta a bobina transmissora, que está acoplada magneticamente à bobina receptora, que coleta a energia emitida, seguida de um circuito retificador com um regulador de tensão de 5V, possibilitando alimentar uma carga. Os circuitos foram montados em matriz de contato e foram confeccionadas 4 bobinas em circuito impresso, sendo 2 modelos de bobinas transmissoras e 2 modelos de bobinas receptoras, que permitiram a realização de testes com diferentes configurações de bobinas. Observou-se o impacto da variação da frequência, da tensão na bobina transmissora, da variação da distância entre as bobinas e do número de espiras das bobinas. A análise destes testes permitiu também observar a eficiência das configurações propostas e também a capacidade de alimentar cargas resistivas, resultando em possibilidades para diversas aplicações.

Palavras-chave: Transferência de energia sem fio, acoplamento magnético ressonante, bobina em circuito impresso.

## **WIRELESS POWER TRANSFER SYSTEM**

### **ABSTRACT**

Wireless power transfer systems are based on the magnetic coupling of coils, allowing several electronic devices to be supplied without using cables. After studying related works, as well as theoretical concepts, such as the resonance effect, the magnetic induction and the skin effect, it was possible to elaborate the complete prototype presented in this paper. The system proposed in this work is compounded of a simple oscillator, which is responsible to generate an alternated signal from the direct current power supply, connected to the transmitting coil, which is magnetically coupled to the receiving coil that collects the energy, followed by a rectifier and a 5V voltage regulator, which can supply energy to a final load. The circuits were assembled on a breadboard and 4 coils were produced using PCB technology, considering 2 different transmitting coils and 2 receiving coils,

which allowed several tests to be conducted, with different configurations of coils. These tests observed the impact of the change on the operating frequency, the voltage supplied to the transmitting coil, the distance between the coils and the number of turns of the coils. The analysis of these tests allowed to observe the efficiency of the proposed configurations, as well as their capability to provide enough power for certain resistive loads, resulting in several possibilities of applications.

Keywords: Wireless power transfer, resonant magnetic coupling, PCB coils.

## 1 INTRODUÇÃO

Ao se abordar o assunto de transferência de energia sem fio (WPT, *Wireless Power Transfer*), não há como não se recordar das invenções de Nikola Tesla, no início do século XX, que já imaginava a possibilidade de eliminar o uso de cabos para fornecer energia elétrica.

Ao longo dos anos, a humanidade acompanha o surgimento dos equipamentos que dependem de energia elétrica para o seu funcionamento, desde seus primórdios até a era atual, com o desenvolvimento da tecnologia e de aparelhos eletrônicos. Estes novos dispositivos surgem para suprir necessidades das mais diversas áreas, entretanto, é notável que o avanço da tecnologia e da eletrônica se deu de forma mais rápida do que dos sistemas de energia, que não acompanharam a evolução tecnológica presente, de modo que atualmente limitam novos dispositivos e invenções, já que estes dependem de uma conexão física com a rede elétrica, ou então de baterias, que exigem serem recarregadas ou substituídas.

Devido à forma que se vive hoje, a autonomia dos dispositivos eletrônicos por meio do uso de baterias tornou-se extremamente comum. Porém, esta tecnologia, conforme expõe Almeida (2015, p. 2, tradução própria), “[...] além de cara e ambientalmente hostil, também é altamente demorada. [...]”.

Ainda no que tange à preocupação com o meio ambiente e à redução de impactos ambientais, questão cada vez mais abordada, Yeole (2013), conforme citado por Santos (2014, p. 13) expõe que estes impactos ambientais causados pelos lixos eletrônicos ocorrem devido à alta demanda de aparelhos móveis e que estes não podem ser descartados de forma inapropriada, devido às substâncias químicas que os compõem.

A partir dos fatores supracitados, os sistemas de transferência de energia sem fio começam a se tornar cada vez mais necessários, assim como a evolução dos sistemas de telefonia e de telecomunicações em geral que, com o passar do tempo, buscaram formas de operação sem fio. Estes sistemas baseiam-se no acoplamento magnético de bobinas e podem ser encontrados atualmente para carregamento de alguns modelos de aparelhos celulares.

Apesar do assunto ter se tornado popular recentemente, devido ao uso desta tecnologia começar a aparecer em aparelhos comerciais, observa-se que, na verdade, a transferência de energia sem fio é empregada nos sistemas de telecomunicações, desde o rádio, com a diferença que nestes o foco está na forma de onda transmitida, pois esta transporta as informações necessárias para estabelecimento da comunicação, enquanto que a potência deste sinal, na sua recepção, é muito baixa. Já nos sistemas de transferência de energia sem fio, o foco está na eficiência da transferência de energia, para atingir uma potência necessária para o funcionamento do sistema, enquanto que a forma de onda pode ser uma simples senóide.

Os sistemas atuais de transferência de energia sem fio ainda se encontram limitados a uma distância de não mais que 2 cm para potências mais elevadas, como visto no trabalho de Kim et. al. (2017). Além disso, as aplicações dadas atualmente, como para o carregamento de celulares, chamam atenção do ponto de vista tecnológico, mas acabam cumprindo uma tarefa já consolidada pelo uso de cabos.

Já no trabalho de Ahire e Gond (2017), pode-se vislumbrar uma melhoria significativa para sistemas biomédicos, de forma a de fato melhorar os métodos atuais destes dispositivos.

O estudo realizado por Ho et. al. (2011), compara o acoplamento magnético de bobinas tradicional com o acoplamento ressonante, para carregadores de bateria sem fio. No protótipo construído, foi utilizado um gerador de sinais conectado a um amplificador de potência, fornecendo um sinal senoidal com frequência de 5 MHz e potência de 0,5W. À uma distância de 5cm, obteve-se eficiência de 73% no sistema ressonante, enquanto que para o sistema tradicional, a distância necessária para se alcançar a mesma eficiência foi de menos de 1cm, evidenciando assim, a importância da ressonância nesses sistemas.

No trabalho de Almeida (2015), foi inspecionado o uso de metamateriais, que atuam como lentes no sistema de transferência de energia sem fio, por meio de simulações computacionais, obtendo-se uma eficiência 50 vezes maior no sistema com dois metamateriais, colocados próximos às bobinas transmissora e receptora, em relação ao sistema sem metamateriais.

Utilizando bobinas com 10cm de diâmetro e 30, 60 e 90 espiras de fio AWG 29, e um sinal senoidal com frequência de 373,1kHz gerado a partir de um oscilador Colpitts projetado, Santos (2015) obteve em sua melhor configuração um rendimento de 57,27% a uma distância de 5cm entre as bobinas. Também foi utilizado neste trabalho uma bobina intermediária, que possibilitou o aumento da distância máxima do seu sistema.

A partir de perspectivas diferentes, os dois últimos trabalhos citados basearam-se no princípio utilizado por pesquisadores do Massachusetts Institute of Technology (MIT), apresentado por Moffatt (2009), que utilizou elementos ressonantes entre as bobinas transmissora e receptora, e conseguiu acender uma lâmpada de 60W a uma distância de 2m com eficiência de 45%.

No trabalho de Kim et. al. (2017), foi utilizado um inversor projetado em 150kHz e que conseguiu uma eficiência de 56% ao transferir 120W a uma distância de 2cm. O autor utilizou 3 bobinas receptoras de modo a ampliar a área de cobertura do seu sistema, já que se tratava de um assento de um veículo, que se desloca em um eixo.

No trabalho de Ahire e Gond (2017), aborda-se a importância desses sistemas para aplicações médicas, em sistemas implantados, como marca-passos, cardioversor desfibrilador implantável (CDI) e implantes cocleares, já que estes dispositivos são alimentados por baterias, e inicialmente era necessário realizar microcirurgias para a sua substituição. Os sistemas de transferência de energia sem fio permitem que estas sejam recarregáveis de forma não invasiva, o que torna o dispositivo mais prático e confortável para seus usuários. Entretanto, o rendimento e a eficiência fornecida pelos sistemas atuais ainda não satisfazem completamente as necessidades presentes.

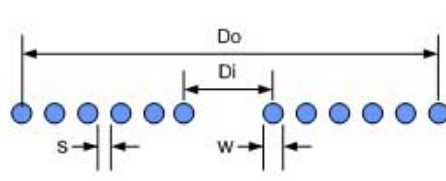
Tem-se como objetivo deste trabalho a montagem de um sistema capaz de transmitir energia sem fio com uso do acoplamento magnético ressonante de bobinas, de modo a verificar os impactos causados com a variação da frequência, da tensão na bobina transmissora e da distância entre as bobinas.

## **2 METODOLOGIA**

Após a realização da revisão da literatura, que consistiu da pesquisa de trabalhos realizados na área de transferência de energia sem fio e do estudo dos fundamentos teóricos necessários para compreensão do funcionamento destes sistemas e fenômenos envolvidos, deu-se início ao desenvolvimento da parte prática deste trabalho.

Para o projeto das bobinas, foi utilizada a calculadora virtual do *Tesla Institute* (2019), que permite calcular a indutância L (em microhenries,  $\mu\text{H}$ ) de uma bobina, baseando-se nas Equações de Wheeler (1928). As Figuras 1, 2 e 3 apresentam a tela da calculadora utilizada com os parâmetros das bobinas projetadas, que permitem observar que os diâmetros externos de todas as bobinas ficaram próximos de 16,5cm, e também que as indutâncias foram de 5,172 $\mu\text{H}$ , 0,503 $\mu\text{H}$  e de 19,344 $\mu\text{H}$ .

Figura 1 – Tela da calculadora para as bobinas transmissora e receptora 1

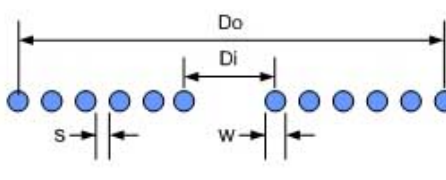


The diagram shows a solenoid coil with an inner diameter  $D_i$  and an outer diameter  $D_o$ . The spacing between turns is  $s$  and the wire diameter is  $w$ .

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 ▾
<input type="button" value="Calculate"/>		<input type="button" value="Clear"/>

Fonte: autoria própria (2019).

Figura 2 – Tela da calculadora para a bobina transmissora 2



The diagram shows a solenoid coil with an inner diameter  $D_i$  and an outer diameter  $D_o$ . The spacing between turns is  $s$  and the wire diameter is  $w$ .

Coil inner diameter (Di):	<input type="text" value="63"/>	mm ▾
Number of turns (N):	<input type="text" value="2"/>	
Wire Diameter (w):	<input type="text" value="25"/>	mm ▾
Spacing between turns (s):	<input type="text" value="0.5"/>	mm ▾
Inductance (L):	<input type="text" value="0.503"/>	uH ▾
Outer diameter (Dout):	<input type="text" value="164.999"/>	mm ▾
Wire lenght (Wl):	<input type="text" value="0.716"/>	m ▾
<input type="button" value="Calculate"/>		<input type="button" value="Clear"/>

Fonte: autoria própria (2019).

Figura 3 – Tela da calculadora para a bobina receptora 2

O diagrama superior mostra uma bobina com 15 bobinas azuis.  $D_o$  é o diâmetro externo total,  $D_i$  é o diâmetro interno da bobina,  $s$  é o espaçamento entre as bobinas e  $w$  é o diâmetro do fio. Abaixo, a interface de usuário contém os seguintes campos:

Coil inner diameter (Di):	<input type="text" value="33"/>	<input type="text" value="mm"/>
Number of turns (N):	<input type="text" value="15"/>	
Wire Diameter (w):	<input type="text" value="4.1"/>	<input type="text" value="mm"/>
Spacing between turns (s):	<input type="text" value="0.3"/>	<input type="text" value="mm"/>
Inductance (L):	<input type="text" value="19.344"/>	<input type="text" value="uH"/>
Outer diameter (Dout):	<input type="text" value="164.999"/>	<input type="text" value="mm"/>
Wire lenght (Wl):	<input type="text" value="4.665"/>	<input type="text" value="m"/>

Botões: Calculate, Clear

Fonte: autoria própria (2019).

Existem basicamente duas tecnologias para a confecção de bobinas, em fio Litz e em placa de circuito impresso (PCB, do inglês *Printed Circuit Board*). As bobinas de Fio Litz, apesar de apresentarem ótimo fator de qualidade e baixas perdas são mais caras do que as bobinas em PCB, que apresentam maior facilidade de fabricação em diversos formatos, apesar de um fator de qualidade menor. (VIGNEAUX et. al., 2015).

Optou-se, portanto, pela confecção de bobinas em PCB devido à maior precisão permitida com o uso de uma prototipadora e pela possibilidade de operação em frequências mais altas.

O desenho das bobinas projetadas para impressão 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.

A confecção das bobinas em PCB foi realizada com uso da prototipadora ProtoMat E33 da LPKF, que comporta placas de até 32cm x 23cm. Foram utilizadas placas de fibra de vidro com espessura do cobre de 17,5 $\mu$ m.

Para medir a indutância e a resistência das bobinas confeccionadas, foi utilizada a Ponte LCR Portátil, em inglês *LCR Meter*, MX-1050 da Minipa.

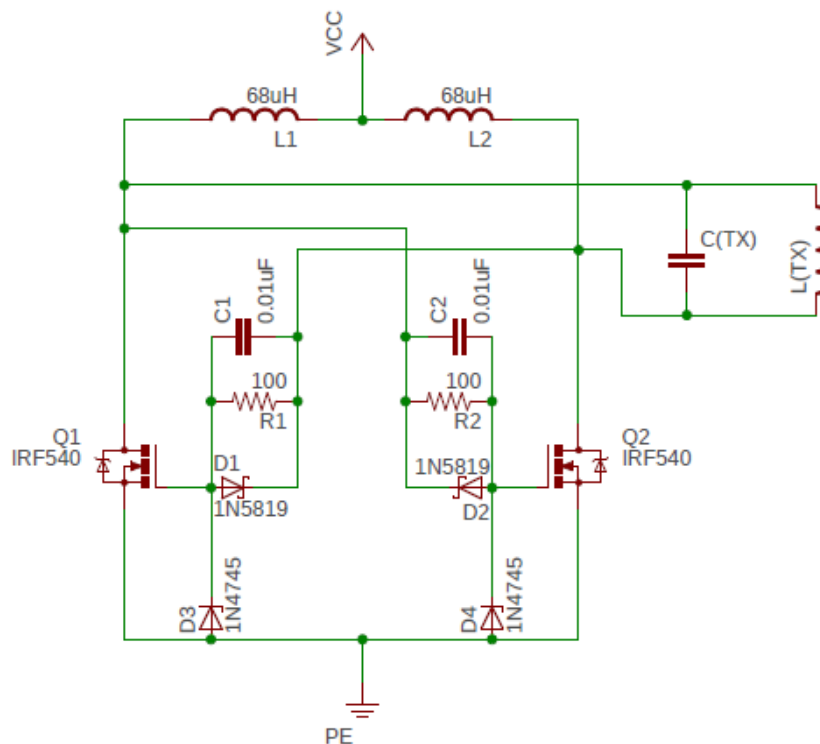
Para a medição e monitoração de tensões e correntes contínuas, foram utilizados 3 multímetros digitais 175 *True RMS* da Fluke.

Para medir as tensões AC e frequências do transmissor e do receptor, bem como para observar e extrair figuras das formas de ondas destes sinais, foi utilizado o osciloscópio TDS 2024C da Tektronix.

Foi utilizada a Fonte DC PS280 da Tektronix para alimentar o circuito transmissor.

O circuito transmissor foi montado em uma matriz de contato, baseado no circuito de referência exposto por Barcelo (2013). Algumas modificações do circuito original foram necessárias, devido à dificuldade de encontrar alguns componentes, principalmente por se tratar de elementos em SMD, dificultando também a facilidade de intercambiar componentes para a realização dos testes, já que estes componentes exigiriam uma montagem do circuito transmissor em PCB. A Figura 4 apresenta o esquema do transmissor utilizado, desenhado no programa Eagle da Autodesk.

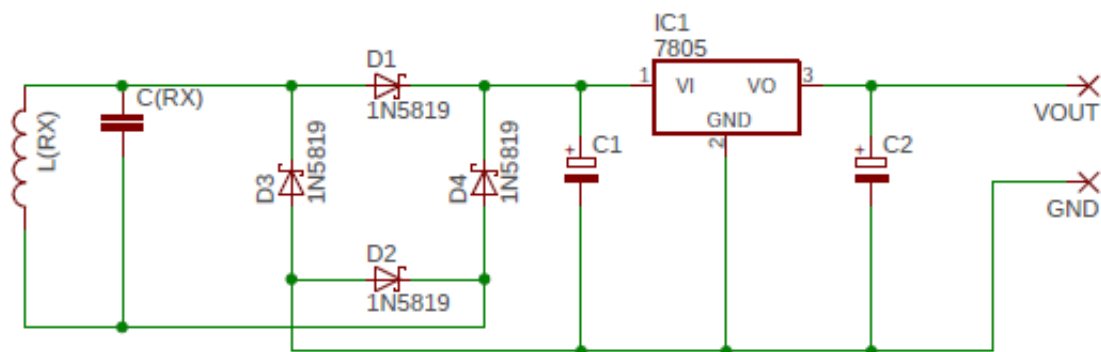
Figura 4 – Esquema elétrico do transmissor utilizado



Fonte: autoria própria (2019).

O circuito receptor também foi montado em uma matriz de contato, sendo constituído de uma ponte de diodos Schottky e um regulador de tensão 7805, além de capacitores eletrolíticos para a filtragem da tensão retificada e estabilização da tensão de saída. A Figura 5 apresenta o esquema do circuito receptor desenhado no Eagle.

Figura 5 – Esquema elétrico do circuito receptor utilizado



Fonte: autoria própria (2019).

Foram projetados 3 modelos de bobinas, sendo que um deles foi confeccionado para ser usado para transmissão e para recepção, totalizando 4 bobinas. A Tabela 1 apresenta os detalhes técnicos destas bobinas.

Tabela 1 – Características das bobinas confeccionadas

<b>Bobina</b>	<b>R (<math>\Omega</math>)</b>	<b>L (<math>\mu\text{H}</math>)</b>
Transmissora 1	0,320	5,603
Receptora 1	0,339	5,653
Transmissora 2	0,113	1,197
Receptora 2	1,137	19,676

Fonte: autoria própria (2019).

Foram então realizados testes em 4 configurações, conforme exibe a Tabela 2.

Tabela 2 – Configuração das bobinas para realização de testes

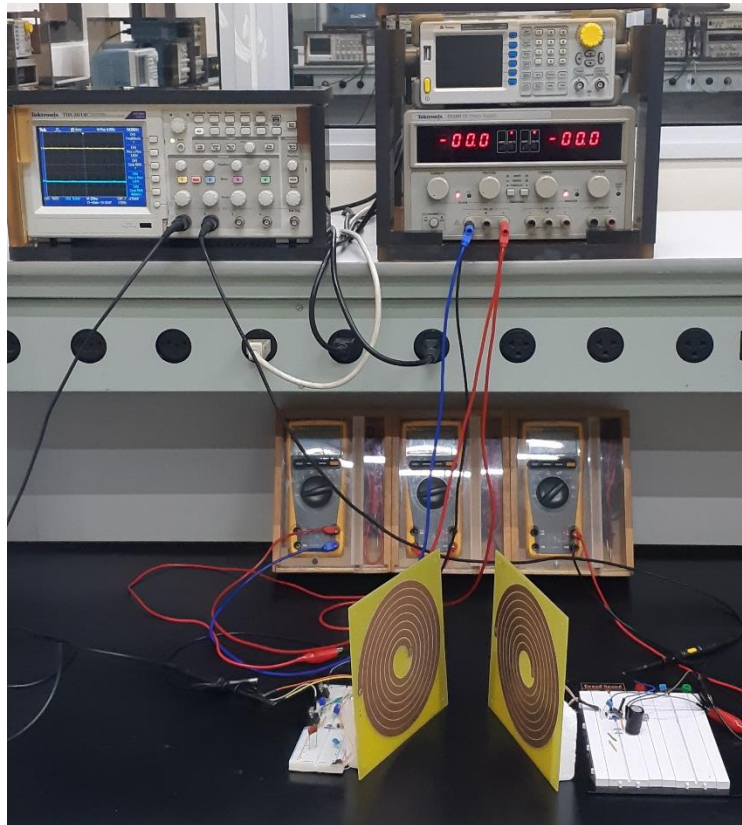
<b>Configuração</b>	<b>Bobina transmissora</b>	<b>Bobina receptora</b>
1	1	1
2	1	2
3	2	1
4	2	2

Fonte: autoria própria (2019).

A Figura 6 apresenta a disposição dos equipamentos utilizados e todo circuito do sistema montado.



Figura 6 – Fotografia da disposição dos equipamentos utilizados para realização dos testes



Fonte: autoria própria (2019).

### 3 RESULTADOS

A Tabela 3 apresenta a variação da frequência em função do valor do capacitor  $C_{TX}$ , onde  $f_T$  é a frequência de ressonância teórica esperada,  $f$  é a frequência medida com uso do osciloscópio,  $I_F$  é a corrente drenada da fonte de alimentação e  $V_{TX_{rms}}$  é a tensão na bobina transmissora. Observa-se que os valores medidos da frequência acompanham os valores teóricos, até um ponto de saturação, evidenciado a partir do capacitor de 6,8nF, devido às capacitâncias parasitas no circuito que limitam a sua operação. O aumento da frequência proporciona uma redução da corrente drenada da fonte, devido ao aumento da reatância dos elementos indutivos e capacitivos, sendo que esta redução da corrente é interessante para diminuir o consumo do sistema e para evitar que os indutores de 68 $\mu$ H utilizados no circuito transmissor sejam danificados.

Tabela 3 – Variação do valor de  $C_{TX}$  na configuração 1 com  $V_F = 5V$ 

$C_{TX}$ nominal (nF)	$f_t$ (kHz)	$f$ (kHz)	$I_F$ (mA)	$V_{TXrms}$ (V)
400	106,73	111,8	656	7,85
300	123,24	128,5	603	8,05
200	150,94	156,5	498	8,45
100	213,46	219,8	328	9,07
47	311,37	326,4	159	9,62
33	371,59	393,9	125	9,89
22	455,1	479,4	121	9,95
15	551,16	550,1	103	10,1
10	675,03	654,5	86	10,1
6,8	818,59	728,3	64	10,4
4,7	984,63	854,7	64	10,2
3,3	1175,07	907,4	63	10,2
2,2	1439,16	1007	62	10,2
1	2134,63	1111	62	10,1

Fonte: autoria própria (2019).

A Tabela 4 apresenta os resultados do teste de variação da tensão de alimentação, que proporciona um aumento da tensão na bobina transmissora, mas também aumenta a corrente drenada pela fonte de alimentação. Este teste permitiu avaliar a possibilidade de aumentar a tensão de alimentação de forma segura para o circuito, ou seja, sem que a corrente drenada pela fonte causasse danos aos componentes deste circuito. Devido à dificuldade de encontrar especificações de componentes passivos como o indutor de  $68\mu H$  utilizado, optou-se por não ultrapassar a tensão de 12V na tensão de alimentação, que implicou em uma corrente drenada na fonte de 327mA.

Tabela 4 – Variação de  $V_F$  na configuração 1 com  $C_{TC} = 1nF$ 

$V_F$ (V)	f (MHz)	$I_F$ (mA)	$V_{TXrms}$ (V)
5	1,114	73	10,0
6	1,101	87	12,2
7	1,104	109	14,6
8	1,116	173	16,3
9	1,112	241	18,3
10	1,122	296	20,2
11	1,144	327	22,1
12	1,163	365	24,4

Fonte: autoria própria (2019).

A Tabela 5 apresenta o resultado do primeiro teste com acoplamento do receptor, na configuração 1, onde foi possível retificar uma tensão de 5V com até 10cm de distância, tensão necessária para alimentar diversos dispositivos eletrônicos e para o carregamento de baterias.

Tabela 5 – Variação da distância entre bobinas na configuração 1 com  $f = 111,8kHz$  e  $V_F = 5V$ 

d (cm)	f (kHz)	$I_F$ (mA)	$V_{TXrms}$ (V)	$V_{RXrms}$ (V)	$V_D$ (V)
1	88,26	795	6,72	6,47	8,66
2	93,81	819	6,62	6,33	8,33
3	96,53	833	6,49	6,17	8,10
4	68,31	845	6,55	6,01	7,86
5	102,7	852	6,35	5,84	7,60
6	105,9	849	6,39	5,51	7,17
7	108,0	837	6,49	5,39	7,03
8	109,9	807	6,66	5,07	6,52
9	110,9	773	6,91	4,55	5,72
10	111,6	732	7,12	4,06	5,20
11	112,6	697	7,31	3,47	4,47

Fonte: autoria própria (2019).

A Tabela 6 apresenta a eficiência desta configuração, observando-se que a variação é baixa para até 3cm de distância entre as bobinas.

Tabela 6 – Eficiência da configuração 1 com  $f = 111,8\text{kHz}$  e  $V_F = 5\text{V}$

<b>d (cm)</b>	<b>S<sub>TX</sub> (VA)</b>	<b>S<sub>RX</sub> (VA)</b>	<b><math>\eta</math> (%)</b>
1	14,46	13,39	92,64
2	13,21	12,07	91,38
3	12,34	11,15	90,33
4	17,68	14,87	84,10
5	11,11	9,39	84,54
6	10,91	8,11	74,32
7	11,04	7,61	68,94
8	11,43	6,62	57,93
9	12,19	5,29	43,34
10	12,86	4,18	32,50
11	13,44	3,03	22,52

Fonte: autoria própria (2019).

A Tabela 7 apresenta o resultado do teste ao se conectar cargas resistivas na saída do receptor.

Tabela 7 – Uso de cargas na configuração 1 com  $f = 111,8\text{kHz}$  e  $V_F = 5\text{V}$

<b>R (<math>\Omega</math>)</b>	<b>d (cm)</b>	<b>I<sub>F</sub> (mA)</b>	<b>I<sub>R</sub> (mA)</b>	<b>P<sub>R</sub> (mW)</b>
4700	8,7	794	1,06	5,32
1000	8,1	808	5,00	25
470	6,8	842	10,64	53,19
100	2,7	920	50,00	250

Fonte: autoria própria (2019).

A Tabela 8 apresenta os resultados quando ainda na configuração 1 foram alterados os capacitores  $C_{TX}$  e  $C_{RX}$  para que o circuito opere na faixa de 1MHz.

Tabela 8 – Variação da distância entre bobinas na configuração 1 com  $f = 1,111\text{MHz}$  e  $V_F = 5\text{V}$

<b>d (cm)</b>	<b>f (MHz)</b>	<b>I<sub>F</sub> (mA)</b>	<b>V<sub>TXrms</sub> (V)</b>	<b>V<sub>RXrms</sub> (V)</b>	<b>V<sub>D</sub> (V)</b>	<b>d (cm)</b>	<b>f (MHz)</b>
1	0,9346	87	10,4	9,46	13,23	1	0,9346
2	0,9747	85	10,1	8,85	11,87	2	0,9747
3	1,010	83	10,1	8,05	10,77	3	1,010
4	1,040	80	10,1	7,27	9,59	4	1,040
5	1,049	77	10,2	6,39	4,43	5	1,049
6	1,064	74	10,2	5,84	7,63	6	1,064
7	1,082	70	10,2	4,64	5,94	7	1,082
8	1,085	68	10,2	3,91	4,88	8	1,085

Fonte: autoria própria (2019).

A Tabela 9 apresenta a eficiência para esta nova frequência. Observa-se que o rendimento ficou abaixo do obtido na frequência de 111,8kHz.

Tabela 9 – Eficiência da configuração 1 com  $f = 1,111\text{MHz}$  e  $V_F = 5\text{V}$

<b>d (cm)</b>	<b>S<sub>TX</sub> (VA)</b>	<b>S<sub>RX</sub> (VA)</b>	<b>η (%)</b>
1	3,10	2,72	87,73
2	2,97	2,28	76,78
3	2,87	1,82	63,53
4	2,79	1,44	51,81
5	2,82	1,11	39,25
6	2,78	0,91	32,78
7	2,73	0,57	20,69
8	2,73	0,40	14,69

Fonte: autoria própria (2019).

A Tabela 10 apresenta o teste feito com as cargas acopladas para a frequência de 1MHz. Observa-se que para as cargas de menor potência (4700Ω, 1000Ω e 470Ω), o resultado é pior do que no teste em menor frequência, justificável pois nestas distâncias a eficiência do sistema de 1MHz é bem menor, porém na frequência mais elevada, a resposta é melhor para a carga de 100Ω e inclusive foi possível alimentar uma carga de 47Ω, que o sistema em 111,8kHz não conseguiu.

Tabela 10 – Uso de cargas na configuração 1 com  $f = 1,111\text{MHz}$  e  $V_F = 5\text{V}$ 

<b>R (<math>\Omega</math>)</b>	<b>d (cm)</b>	<b>I<sub>F</sub> (mA)</b>	<b>I<sub>R</sub> (mA)</b>	<b>P<sub>R</sub> (mW)</b>
4700	5,6	76	1,06	5,32
1000	5,4	84	5,00	25
470	5,3	92	10,64	53,19
100	3,6	172	50,00	250
47	1,7	290	106,38	531,91

Fonte: autoria própria (2019).

A Tabela 11 apresenta os resultados quando a tensão de alimentação foi elevada para 12V, mantendo-se a frequência de 1,111MHz. Observa-se que com 9 centímetros de distância, o osciloscópio apresentou um aumento da tensão eficaz na bobina receptora, mas a tensão retificada medida pelo multímetro manteve-se em conformidade com os demais valores, ou seja, apresentando uma queda no seu valor conforme a distância foi aumentada, evidenciando novamente uma possível medida incorreta apresentada pelo osciloscópio, possivelmente causada por pequenas variações na medição dos valores.

Tabela 11 – Variação da distância entre bobinas na configuração 1 com  $f = 1,111\text{MHz}$  e  $V_F = 12\text{V}$ 

$d$ (cm)	$f$ (MHz)	$I_F$ (mA)	$V_{TXrms}$ (V)	$V_{RXrms}$ (V)	$V_D$ (V)
1	0,9852	389	24,1	22,5	33,09
2	1,024	376	24,3	22,2	32,78
3	1,073	372	24,4	21,5	31,45
4	1,109	367	24,5	21,3	30,64
5	1,142	365	24,5	20,7	30,18
6	1,166	362	24,6	20,6	29,41
7	1,185	362	24,6	20,7	28,94
8	1,185	359	24,5	18,6	27,82
9	1,199	359	24,6	20,5	27,49
10	1,214	350	24,7	16,5	24,47
11	1,222	343	24,7	16,0	21,19
12	1,238	342	24,8	13,3	20,16
13	1,244	336	24,8	11,7	17,67
14	1,241	330	24,7	10,9	14,04
15	1,250	327	24,8	7,66	11,56
16	1,259	325	24,9	6,69	9,76
17	1,247	323	24,8	6,50	7,91
18	1,236	321	24,8	4,75	6,72
19	1,229	320	24,7	4,18	5,63
20	1,255	319	24,9	4,11	5,19
21	1,247	319	24,9	3,55	4,27

Fonte: autoria própria (2019).

A Tabela 12 apresenta a eficiência para esta nova condição, e observa-se que, em relação ao teste com alimentação de 5V, a eficiência se mostrou mais estável, apresentando um valor de 57,64% a uma distância de 8cm, enquanto que para o teste com menor tensão a eficiência foi de 14,69% para a mesma distância. O aparente aumento na eficiência na distância de 8cm pode ter sido causado por causa de imprecisões das medidas obtidas com o osciloscópio, conforme visto na variação da tensão na Tabela 11.

Tabela 12 – Eficiência da configuração 1 com  $f = 1,111\text{MHz}$  e  $V_F = 12\text{V}$ 

<b>d (cm)</b>	<b>S<sub>TX</sub> (VA)</b>	<b>S<sub>RX</sub> (VA)</b>	<b><math>\eta</math> (%)</b>
1	16,75	14,60	87,16
2	16,38	13,67	83,46
3	15,76	12,24	77,64
4	15,37	11,62	75,58
5	14,93	10,66	71,38
6	14,76	10,34	70,12
7	14,51	10,37	70,81
8	14,39	8,29	57,64
9	14,37	9,96	69,44
10	14,27	6,67	44,62
11	14,18	5,95	41,96
12	14,11	4,06	28,76
13	14,04	3,13	22,26
14	13,96	2,72	19,47
15	13,98	1,33	9,54
16	13,99	1,01	7,21
17	14,01	0,96	6,87
18	14,13	0,52	3,67
19	14,10	0,40	2,86
20	14,03	0,38	2,72
21	14,12	0,29	2,03

---

Fonte: autoria própria (2019).

Para o teste com cargas, esta configuração foi a única capaz de alimentar o resistor de  $10\Omega$ , fornecendo assim  $2,5\text{W}$  para esta carga, potência suficiente para carregar um celular, por exemplo. Este teste com cargas é apresentado na Tabela 13.



Tabela 13 – Uso de cargas na configuração 1 com  $f = 1,111\text{MHz}$  e  $V_F = 12\text{V}$ 

<b>R (<math>\Omega</math>)</b>	<b>d (cm)</b>	<b>I<sub>F</sub> (A)</b>	<b>I<sub>R</sub> (mA)</b>	<b>P<sub>R</sub> (mW)</b>
4700	15,8	0,327	1,06	5,32
1000	14,8	0,327	5,00	25
470	12,5	0,333	10,64	53,19
100	6,7	0,359	50,00	250
47	4,3	0,397	106,38	531,91
10	0,6	1,104	500,00	2500,00

Fonte: autoria própria (2019).

A Tabela 14 apresenta os resultados para a configuração 2. Na Tabela 15, pode-se observar que a eficiência deste sistema ficou abaixo de todos os testes anteriores, já que para a distância mínima testada apresentou eficiência de 61,95%. Entretanto, observa-se também que houve maior variação da frequência do sinal no transmissor, justificando essa menor eficiência.

Tabela 14 – Variação da distância entre bobinas na configuração 2

<b>d (cm)</b>	<b>f (MHz)</b>	<b>I<sub>F</sub> (mA)</b>	<b>V<sub>TXrms</sub> (V)</b>	<b>V<sub>RXrms</sub> (V)</b>	<b>V<sub>D</sub> (V)</b>	<b>d (cm)</b>	<b>f (MHz)</b>
1	1,887	547	24,0	35,4	50,54	1	1,887
2	1,546	438	24,0	36,3	47,69	2	1,546
3	1,456	410	24,9	32,1	45,20	3	1,456
4	1,404	389	25,2	31,2	40,24	4	1,404
5	1,346	377	25,3	27,9	36,96	5	1,346
6	1,294	370	25,3	24,4	33,51	6	1,294
7	1,287	361	25,4	22,0	28,40	7	1,287
8	1,285	353	25,6	20,5	21,56	8	1,285
9	1,280	356	25,5	13,7	23,54	9	1,280
10	1,265	351	25,5	14,1	18,83	10	1,265
11	1,268	350	25,7	11,0	16,23	11	1,268
12	1,250	347	25,6	10,0	12,58	12	1,250
13	1,259	345	25,7	7,15	10,01	13	1,259
14	1,247	344	25,7	5,92	7,72	14	1,247
15	1,266	342	25,6	4,75	5,88	15	1,266
16	1,263	341	25,5	4,25	5,28	16	1,263
17	1,266	337	25,7	3,33	3,95	17	1,266

Fonte: autoria própria (2019).

Tabela 15 – Eficiência da configuração 2

<b>d (cm)</b>	<b>S<sub>TX</sub> (VA)</b>	<b>S<sub>RX</sub> (VA)</b>	<b>η (%)</b>
1	8,67	5,37	61,95
2	10,58	6,89	65,14
3	12,10	5,72	47,33
4	12,85	5,61	43,65
5	13,51	4,68	34,63
6	14,05	3,72	26,49
7	14,24	3,04	21,36
8	14,49	2,65	18,26
9	14,43	1,19	8,22
10	14,60	1,27	8,71
11	14,80	0,77	5,22
12	14,89	0,65	4,35
13	14,90	0,33	2,20
14	15,04	0,23	1,51
15	14,70	0,14	0,98
16	14,62	0,16	0,79
17	14,82	0,07	0,48

Fonte: autoria própria (2019).

Entretanto, mesmo com baixa eficiência, esta configuração foi capaz de fornecer até 531,91mW para uma carga de 47Ω, conforme exhibe a Tabela 16.

Tabela 16 – Uso de cargas na configuração 2

<b>R (Ω)</b>	<b>d (cm)</b>	<b>I<sub>F</sub> (mA)</b>	<b>I<sub>R</sub> (mA)</b>	<b>P<sub>R</sub> (mW)</b>
4700	13,2	339	1,06	5,32
1000	11,4	351	5,00	25
470	9,3	352	10,64	53,19
100	4,6	380	50,00	250
47	2,4	482	106,38	531,91

Fonte: autoria própria (2019).

A Tabela 17 apresenta os resultados para a configuração 3.

Tabela 17 – Variação da distância entre bobinas na configuração 3

<b>d (cm)</b>	<b>f (MHz)</b>	<b>I<sub>F</sub> (mA)</b>	<b>V<sub>TXrms</sub> (V)</b>	<b>V<sub>RXrms</sub> (V)</b>	<b>V<sub>D</sub> (V)</b>
1	1,040	646	7,61	15,4	22,01
2	1,075	659	7,51	13,4	18,54
3	1,099	660	7,43	11,5	15,83
4	1,119	665	7,41	10,0	13,91
5	1,120	664	7,35	8,95	11,78
6	1,139	661	7,35	6,69	8,87
7	1,147	664	7,44	6,16	7,83
8	1,152	663	7,45	4,92	6,21
9	1,152	661	7,44	3,94	4,965

Fonte: autoria própria (2019).

Nesta configuração, o rendimento ficou um pouco abaixo do obtido na configuração 1, com frequência de 1,111MHz e alimentação de 5V, conforme apresentado pela Tabela 18.

Tabela 18 – Eficiência da configuração 3

<b>d (cm)</b>	<b>S<sub>TX</sub> (VA)</b>	<b>S<sub>RX</sub> (VA)</b>	<b>η (%)</b>
1	7,40	6,48	87,49
2	6,98	4,74	68,02
3	6,68	3,42	51,18
4	6,52	2,54	38,9
5	6,41	2,03	31,68
6	6,31	1,12	17,7
7	6,42	0,94	14,65
8	6,41	0,60	9,32
9	6,34	0,38	6,04

Fonte: autoria própria (2019).

O seu resultado para o teste com cargas é apresentado na Tabela 19.

Tabela 19 – Uso de cargas na configuração 3

<b>R (<math>\Omega</math>)</b>	<b>d (cm)</b>	<b>I<sub>F</sub> (mA)</b>	<b>I<sub>R</sub> (mA)</b>	<b>P<sub>R</sub> (mW)</b>
4700	7,9	663	1,06	5,32
1000	7,4	668	5,00	25
470	7,1	672	10,64	53,19
100	4,0	738	50,00	250

Fonte: autoria própria (2019).

Para a configuração 4, não foi possível levantar os resultados completos de variação da distância nem calcular a eficiência, pois o regulador de tensão não suportou a tensão fornecida por este sistema. Seria possível levantar os resultados sem a presença deste elemento, mas os resultados não seriam comparáveis com os demais testes, onde o regulador de tensão esteve presente. A Tabela 20 apresenta os testes com cargas para esta configuração.

Tabela 20 – Uso de cargas na configuração 4

<b>R (<math>\Omega</math>)</b>	<b>d (cm)</b>	<b>I<sub>F</sub> (mA)</b>	<b>I<sub>R</sub> (mA)</b>	<b>P<sub>R</sub> (mW)</b>
4700	12,7	683	1,06	5,32
1000	9,8	691	5,00	25
470	7,6	703	10,64	53,19
100	2,1	782	50,00	250

Fonte: autoria própria (2019).

## 5 DISCUSSÃO

Na configuração 1, observa-se que o aumento da frequência resultou em uma queda da eficiência do sistema, caindo de 92,38% para 87,73% a uma distância de 1cm entre transmissor e receptor. Por outro lado, no teste com cargas resistivas acopladas ao receptor, somente quando a frequência foi elevada que conseguiu-se alimentar a carga de 47 $\Omega$ .

Ainda nesta mesma configuração, com o aumento da tensão de alimentação do circuito, além do aumento da tensão na bobina transmissora, notou-se que a eficiência do sistema também aumentou, assim como a distância mínima para a alimentação das cargas, atingindo inclusive a única configuração capaz de alimentar o resistor de 10 $\Omega$ , ou seja, de fornecer uma potência de 2,5W, mesmo que a uma curta distância.

Nas 3 primeiras configurações, observou-se uma variação da frequência com a variação da distância entre as bobinas, porém, na primeira configuração, esta variação foi de aproximadamente 100kHz nos casos mais extremos, enquanto que para a configuração 2, a frequência para a distância de 1cm ultrapassou os 1,8MHz, justificando o seu baixo rendimento, já que houve um afastamento

considerável da frequência de ressonância calculada. Mesmo apresentando este baixo rendimento, a configuração 2 conseguiu alimentar as cargas resistivas à distâncias superiores à configuração 1, nos dois testes de frequências diferentes, com alimentação de 5V, que apresentaram eficiência maior.

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Conseguiu-se construir um sistema capaz de transferir energia sem fio, tanto para uma carga com potência de 2,5W para uma distância de 0,6cm, como para potências menores em até 15,8cm.

Foram apresentados 3 modelos de bobinas, e constatou-se que a calculadora utilizada, baseada nas Equações de Wheeler apresentam erro maior do que 5% para os dois primeiros modelos de bobinas propostos.

As diferentes configurações propostas permitiram observar a variação dos parâmetros propostos nos objetivos específicos deste trabalho.

Assim, os objetivos determinados no início deste trabalho foram alcançados.

Em trabalhos que tenham uma aplicação definida, pode-se desprezar uma característica em função da outra, a fim de atender esta aplicação específica da melhor forma possível, como uma alta potência em curtas distâncias, mesmo que isso implique em uma baixa eficiência em longas distâncias.

Caso seja realizado um estudo mais teórico, pode-se levantar mais resultados, como a resposta de um sistema para 10 frequências, por exemplo, além de outros métodos para geração do sinal alternado que alimenta a bobina transmissora.

Uma última recomendação é de observar a variação da frequência após o acoplamento das bobinas, para que se avalie a necessidade de ajuste por meio da mudança do valor dos capacitores utilizados, de modo a garantir a ressonância do sistema.

## REFERÊNCIAS

AHIRE, Dnyaneshwar B.; GOND, Vitthal J. **Wireless Power Transfer Systems for Biomedical Application: A Review**. International Conference on Trends in Electronics and Informatics, 2017, IEEE.

ALMEIDA, Jorge Virgilio de. **Metamaterials applied to inductive wireless power transmission**. 2015. 74 f. Projeto de Graduação (Bacharelado em Engenharia Elétrica)-Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015.

BARCELO, Trevor. **Wireless Power User Guide**. Analog Devices, Application Note 138, out. 2013. Disponível em: <<https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/application-notes/an138fc.pdf>>. Acesso em: 11 mar. 2019.

KIM, Seong-Min; MOON, Jung-Ok; KIM, Sang-Won; CHO, In-Kui. **120W Wireless Power Transfer System for the Wireless Seat in Automobile**. Progress In Electromagnetics Research Symposion – Fall (PIERS – FALL), 2017, p. 2635-2637.

MOFFATT, Robert Alexander. **Wireless Transfer of Electric Power**. 2009. 49 f. Projeto de Graduação (Bacharelado em Física) - Massachusetts Institute Of Technology, Cambridge, 2009. Disponível em: <<http://dspace.mit.edu/handle/1721.1/51595#files-area>>. Acesso em: 23 maio. 2017.

SANTOS, Guilherme Boscolo dos. **Transmissão de energia elétrica por acoplamento eletromagnético**. 2015. 74 f. Projeto do Trabalho de Graduação Interdisciplinar (Bacharelado em Engenharia Elétrica)-Universidade Presbiteriana Mackenzie, São Paulo, 2015.

TESLA INSTITUTE. **Flat spiral coil inductor calculator**. Disponível em: <<http://www.tesla-institute.com!/app/sim/fscic.php>>. Acesso em: 27 mai. 2019.

VIGNEAUX, Guillaume; CHEIKH, Mohammed; BENBOUHOUT, R.; TAKACS, Alexandru. Design and modeling of PCB coils for inductive power charging. *Wireless Power Transfer*, Cambridge University Press, 2015.

### **AGRADECIMENTOS**

À Universidade Presbiteriana Mackenzie e ao Laboratório de Elétrica e Eletrônica da Escola de Engenharia por oferecer espaço e equipamentos que viabilizaram este trabalho.

Ao técnico do laboratório Edgar pelo auxílio no uso da Prototipadora utilizada para a confecção das bobinas em PCB.