



PROTÓTIPO DE TRANSMISOR E RECEPTOR DE ENERGIA SEM FIO

José Ilton de Oliveira Filho – ilton104@hotmail.com

Universidade Federal do Piauí, Departamento de Engenharia Elétrica
Campus Universitário Ministro Petrônio Portella, Avenida Universitária - Bairro Ininga
64.049-550 – Teresina – Piauí

Jônatas Macêdo Soares – jonattasms@gmail.com

Universidade Federal do Piauí, Departamento de Engenharia Elétrica
Campus Universitário Ministro Petrônio Portella, Avenida Universitária - Bairro Ininga
64.049-550 – Teresina – Piauí

Pedro Iago Carvalho Martins – pedro.m4rtins@gmail.com

Universidade Federal do Piauí, Departamento de Engenharia Elétrica
Campus Universitário Ministro Petrônio Portella, Avenida Universitária - Bairro Ininga
64.049-550 – Teresina – Piauí

Dannilo Neiva de Carvalho – danniloneiva_18@hotmail.com

Universidade Federal do Piauí, Departamento de Engenharia Elétrica
Campus Universitário Ministro Petrônio Portella, Avenida Universitária - Bairro Ininga
64.049-550 – Teresina – Piauí

Resumo: Este artigo apresenta o desenvolvimento de protótipo de transmissor e receptor sem fio desenvolvido durante a disciplina de Conversão Eletromagnética do Curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Piauí - UFPI. O protótipo foi desenvolvido pelos alunos visando uma maior compreensão e uma forma lúdica de se ensinar conceitos e as formulações das leis que regem o magnetismo. Esse trabalho apresenta uma análise teórica, um estudo sobre a técnica de transmissão de energia sem fios por modos ressonantes, e o protótipo final concebido, além dos seus resultados.

Palavras-chave: Carregador, Indutância mútua, Transmissão sem fio.

1 INTRODUÇÃO

O conceito de transmissão de energia sem fio não é atual, um dos primeiros a pesquisar a fundo esse tipo de transmissão foi Nikola Tesla, que ao final do século XIX e início do século XX tentou, sem grandes sucessos, transmitir grande quantidade de energia sem a necessidade da rede elétrica dotada de fios como meio de transmissão (TESLA, 1914). Porém, as perdas no seu sistema de transmissão, se mostraram inviáveis quando se comparado ao sistema com fios utilizados até hoje (ABREU, 2012). Esse sistema empregava uma técnica que faz uso da ressonância de circuitos elétricos para transmitir energia elétrica através de ondas eletromagnéticas (CARLSON, 2007).

Tais ondas eletromagnéticas foram prevista pelo físico e matemático James Clerk Maxwell em 1864 e comprovada por Heinrich Hertz em 1887 (NUSSENZVEIG, 2006). Essas



ondas geradas por um circuito elétrico são capazes de influenciar outro circuito, mesmo não havendo conexão condutiva entre eles. Este fenômeno é conhecido como indução magnética, explicada pela Lei de Faraday, umas das leis fundamentais que compõe a base do eletromagnetismo clássico (SADIKU, 2004).

Atualmente, o conceito de não utilização de fios para a transmissão de energia baseado na ressonância por acoplamento indutivo magnético é conhecido como Witricity (WITRICITY, 2016). Esse conceito, no entanto, não é usado para transmissão de energia à longa distância, pois as antenas omnidirecionais são empregadas apenas para transmissão de informações, uma vez que neste padrão grande parte da energia é perdida no espaço livre (RIBEIRO, 2004) (KARALIS; JOANNOPOULOS; SOLJACIC, 2006).

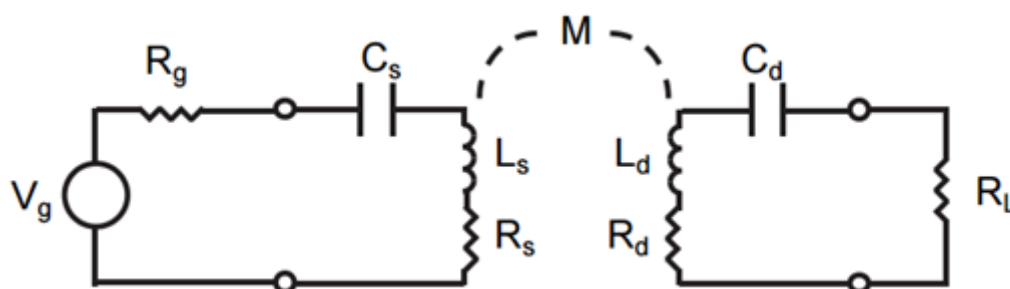
Com o objetivo de ensinar as leis e equações do magnetismo clássico, durante a disciplina de Conversão Eletromagnética, esse projeto foi elaborado e posto em prática por alunos da Universidade Federal do Piauí.

2 METODOLOGIA

2.1 Desenvolvimento teórico

O método de transmissão sem fio escolhido, chamado de transmissão por modos ressonantes, vem sendo amplamente desenvolvido por pesquisadores do MIT, que no ano de 2013 já consideravam o seu uso em ambientes extensos, por meio de repetidores (WITRICITY, 2016). O modelo de acoplamento ressonante consiste em dois circuitos RLC paralelos e acoplados magneticamente. O circuito atua como um transformador, transferindo energia do circuito primário para o circuito secundário. A base da transferência de energia está no uso de sistemas ressonantes modelados e dispostos de forma tal que a transmissão seja viabilizada (CANNON et al., 2009). A Figura 1 apresenta o modelo de acoplamentos ressonantes.

Figura 1 – Circuitos RLC série acoplados por bobinas.



As correntes e as tensões no primário e no secundário da Figura 1 são dadas pela equação (1) abaixo. A constante M é a indutância mútua do sistema, em que $M = K\sqrt{L_1L_2}$.

$$\begin{bmatrix} v_1(t) \\ v_2(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_1 & M \\ M & L_2 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \frac{di_1(t)}{dt} \\ \frac{di_2(t)}{dt} \end{bmatrix} \quad (1)$$



Ao combinar 2 circuitos de segunda ordem, cada qual com sua frequência de ressonância e fator de qualidade Q . Diferentes partes do circuito possuem distintas frequências de ressonância, que estão relacionadas às frequências independentes de origem. Para o caso em estudo, $L_1 = L_2$. Logo a matriz Eq. (1) torna-se $\begin{bmatrix} L & kL \\ kL & L \end{bmatrix}$. Aplicando as leis de Kirchhoff ao circuito e efetuando a transformada de Laplace com condições iniciais nulas, chegamos ao sistema linear seguinte:

$$\begin{bmatrix} G+sC & 0 & 1 & 0 \\ 0 & G+sC & 0 & 1 \\ 1 & 0 & -sL & -sKL \\ 0 & 1 & -sKL & -sL \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1(s) \\ V_2(s) \\ I_1(s) \\ I_2(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I(s) \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

O determinante da matriz acima é dado por:

$$\det = [CL(1-k)s^2 + GL(1-k)s + 1] [CL(1+k)s^2 + GL(1+k)s + 1] \quad (3)$$

Dessa forma, chega-se a um sistema de quarta ordem e quatro pólos:

$$s_{1,2} = \frac{-G}{2C} \pm j\sqrt{\frac{1}{CL(1+K))} - \frac{G^2}{4C^2}} \quad (4)$$

$$s_{3,4} = \frac{-G}{2C} \pm j\sqrt{\frac{1}{CL(1-K))} - \frac{G^2}{4C^2}} \quad (5)$$

Para facilitar, usa-se a notação:

$$\begin{cases} \alpha = \frac{G}{2C} \\ w_1^2 = \frac{1}{CL(1+k)} & w_2^2 = \frac{1}{CL(1-k)} \end{cases} \quad (6)$$

A partir das equações acima, pode-se deduzir a expressão de impedância de transferência $V_2(s) / I(s)$ do circuito ressonante e fazendo $s = jw$, chega-se a:

$$\frac{V_s(jw)}{I(jw)} = \frac{k}{C^2(1-k^2)} \frac{1}{jwL} \frac{jw}{(w_1^2 - w^2 + j2\alpha w)} \frac{jw}{(w_2^2 - w^2 + j2\alpha w)} \quad (7)$$



A partir da expressão acima, pode-se prever a curva da resposta em frequência. Ela é composta pelo produto de quatro fatores: o primeiro é um fator de escala; o segundo cresce com o inverso da frequência e os dois últimos apresentam um comportamento ressonante com os seus picos em ω_1 e ω_2 . Para se obter a máxima transferência de potência, é necessário que a frequência ω_1 e ω_2 sejam as frequências de ressonância do sistema e que sejam iguais.

2.2 Desenvolvimento do *hardware*

O protótipo consiste de um circuito básico de um par de bobinas e de um oscilador. A primeira bobina construída seguiu os dados informados de um projeto feito por Werich (WERICH, 2016) para propósitos similares, porém, apesar de termos conseguido um acoplamento ressonante satisfatório em termos de frequência e transmissão da forma da onda, não tivemos uma transferência de energia adequada, capaz de superar o mínimo de 2.7v necessários para ligar um simples LED. Diversas bobinas foram usadas, a fim de melhorar a eficiência total do protótipo e, ao final, foi escolhida dois pares de bobina com frequências de ressonância próximas, dentro de faixas menores que 1 mega-hertz. Na Figura 2 podemos ver as bobinas construídas para esse projeto.

Figura 2 – (a) Bobina de pequena indutância, (b) bobina em formato quadrado com capacitor e resistor soldados em conjunto, (c) bobina de maior raio, (d) bobina utilizada atualmente.

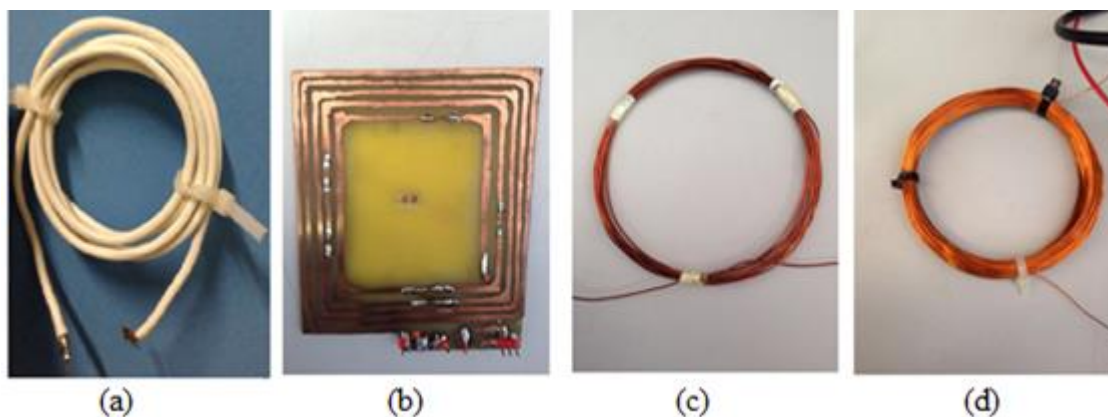


Tabela 1 - Valores físicos das bobinas construídas.

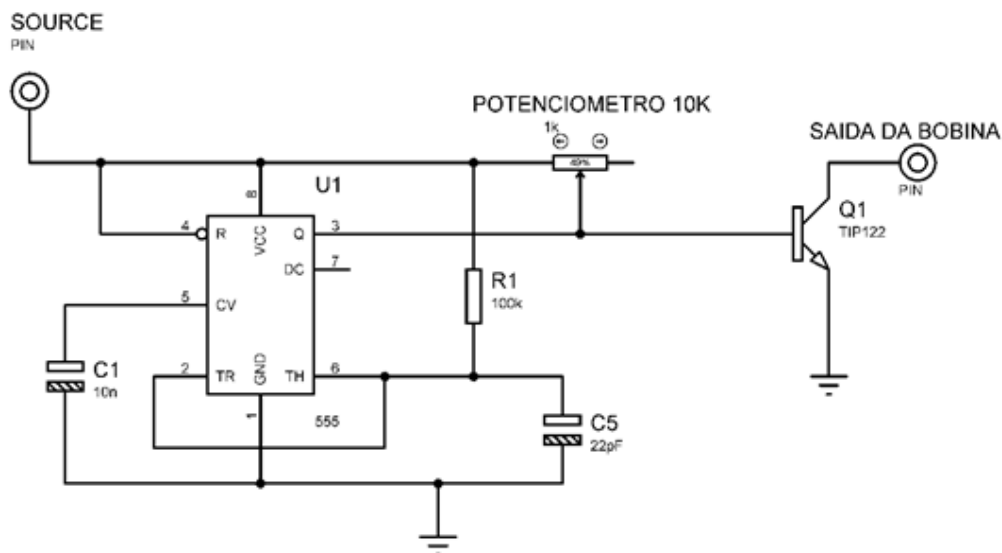
Diferença entre os raios	1,7cm
Raio médio	8,85 cm
Comprimento das bobinas	1,3 cm
Número de fios	127
Raio interno	8,0 cm
Raio externo	9,7 cm

As bobinas utilizadas no protótipo final foram construídas de forma idêntica, para que fosse possível obter a mesma frequência de ressonância em ambas. A Tabela 1 apresenta os valores das bobinas.



As bobinas utilizadas no protótipo final possuem frequência ressonante dentro da faixa de 100kHz à 300kHz, tornando possível utilizar um circuito oscilador eletrônico. O oscilador construído foi um multivibrador estável com um CI 555. A Figura 3 apresenta o diagrama do circuito construído.

Figura 3 – Circuito oscilador com frequência variável construído.



3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

As Figuras 4 e 5 apresentam o protótipo do transmissor e receptor construído. O transmissor incorpora outras funções além do envio dos dados, uma vez que, ele será usado para demonstração de outros conteúdos durante o curso.

Figura 4 – Protótipo transmissor construído.

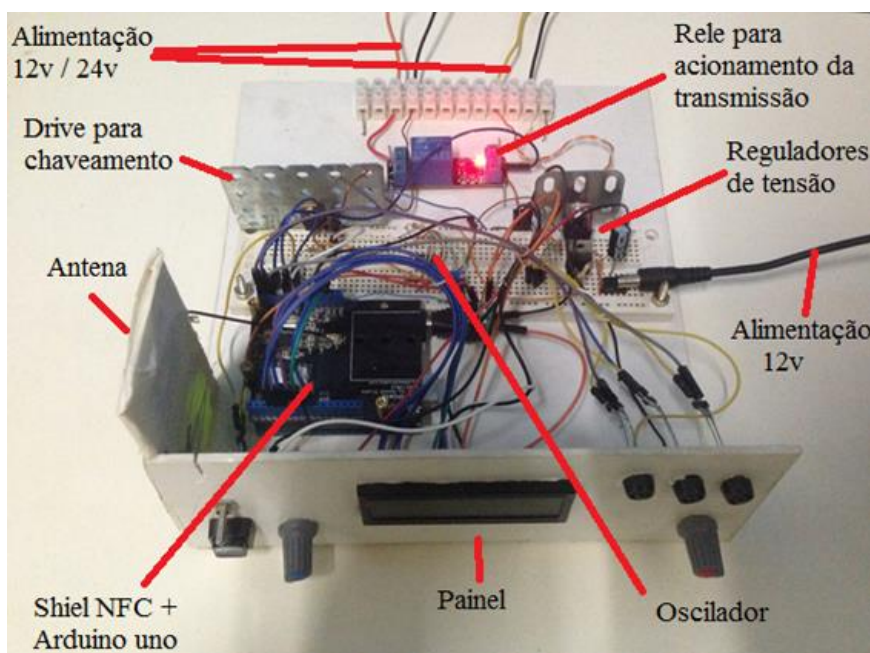
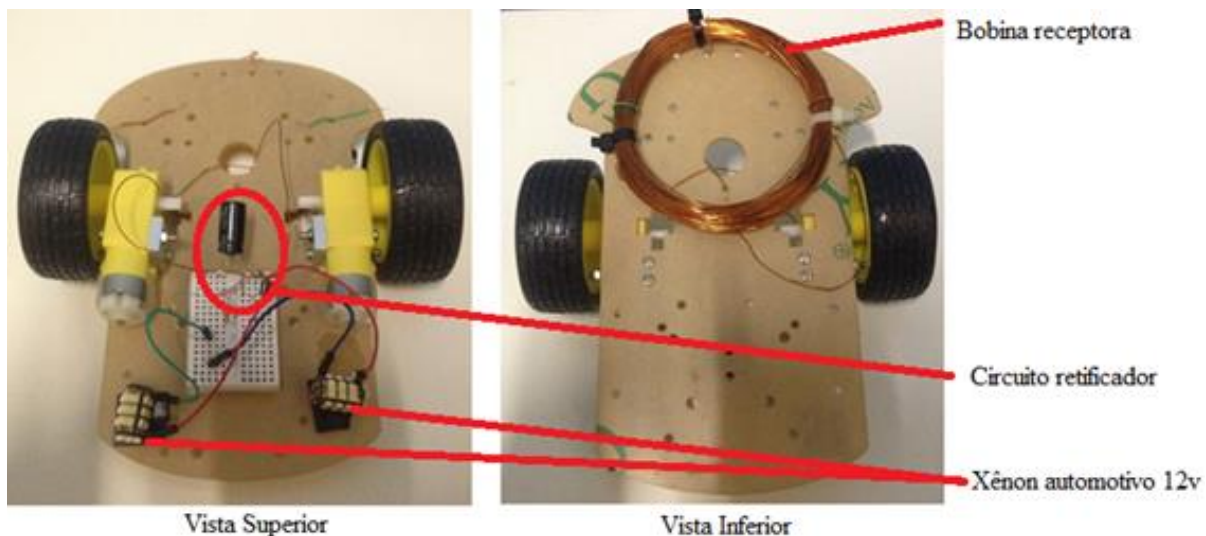




Figura 5 – Protótipo receptor construído.



Realizaram-se dois ensaios nesse circuito de transmissão sem fio. O primeiro teste tentou estimar os valores de indutância mútua entre as bobinas em função da distância. Já o segundo utilizou o circuito final para enviar e medir as potências CC entregue aos circuitos fonte e destino, também variando a distância. O objetivo era relacionar o acoplamento das duas bobinas com a eficiência da transmissão de potência. O acoplamento k do campo magnético, junto com os fatores de qualidade Q dos osciladores são as variáveis que melhor caracterizam a eficiência nesse tipo de transmissão, por modo ressonante. Entretanto, devido à incerteza no valor de capacitância parasita, optou-se por utilizar o primeiro teste apenas para amostrar a resposta em frequência da bobina, e seu valor ressonante. A Tabela 2 apresenta os valores obtidos.

Tabela 2 - Valores de R , L e Q das bobinas.

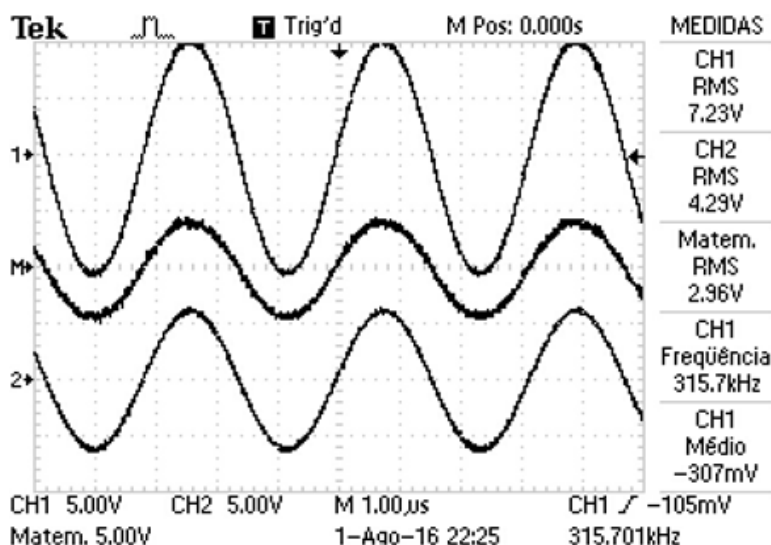
	Bobina S (Fonte)	Bobina D (Destino)
$R (\Omega)$	2.8	1.9
$L (mH)$	2.23	1.942
Q	225.2 (à 282 kHz)	324.02 (à 317 kHz)

No ensaio de eficiência, o acoplamento das bobinas forneceu tensão suficiente para a carga até a uma distância de 5 cm, com eficiência máxima de 20%. Quando o indutor entra em ressonância própria, a sua impedância atinge o seu valor máximo e uma maior tensão é distribuída nos seus terminais. Montando-se o divisor com a bobina S (fonte), na ausência da bobina D (destino), pode-se detectar a ressonância própria de S em proximamente 280 kHz; o mesmo vale para descobrir a frequência de ressonância de D , de 315 kHz. A Figura 6 apresenta as ondas de do transmissor e do receptor.

Na Tabela 3 são apresentados os valores de tensão e eficiência obtidos no experimento. A eficiência do transmissor sem fio foi bem baixa, com um máximo de 22.34%, na situação em que as bobinas estavam uma logo em cima da outra. À medida que distância entre os seus centro aumenta, a eficiência cai de forma desacelerada, quase que estabilizando em 5% entre 2 e 3 cm.



Figura 5 – Tensão em cima da bobina S (1) e tensão na bobina D (2).



4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Nesse projeto, os alunos puderam compreender de forma prática os conteúdos abordados nas disciplinas que envolvam os princípios e formulações do eletromagnetismo e conversão eletromagnética, sendo esse projeto, uma forma lúdica de se ensinar assuntos que são considerados complexos pelos próprios alunos.

De acordo com o ensaio de eficiência, as duas bobinas projetadas foram capazes de enviar 20% da potência à aproximadamente 1cm na direção do normal, o que já as tornariam elegíveis para a alimentação de escovas elétricas ou celulares. Para uma transmissão mais eficiente e à maior distância, a diminuição da capacitância parasita e a utilização de capacitores conhecidos ficam com futuras tentativas de melhoria ao projeto. Além disso, uma melhor estratégia de inversão de tensão pode ser considerada e um controle adaptativo da frequência de operação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABREU, R. L. *Projeto e Desenvolvimento de Dispositivo para Transmissão de Energia Elétrica sem Fios por Modos Ressonantes*. Dissertação (Mestrado)—UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ, Itajubá, Minas Gerais, 2012.

CANNON, B. L. et al. *Magnetic resonant coupling as a potential means for wireless power transfer to multiple small receivers*. IEEE Transactions on Power Electronics, v. 24, n. 7, p. 1819–1825, July 2009. ISSN 0885-8993.

CARLSON, W. B. *Harnessing the earth: Nikola tesla and the idea of broadcasting electric power*. In: 2007 IEEE Conference on the History of Electric Power. [S.l.: s.n.], 2007. p. 10–47.

KARALIS, A.; JOANNOPOULOS, J. D.; SOLJACIC, M. *Efficient wireless nonradiative*

Organização



UDESC
UNIVERSIDADE
DO ESTADO DE
SANTA CATARINA



Promoção





mid-range energy transfer. In: ANNALS OF PHYSICS. [S.l.: s.n.], 2006.

NUSSENZVEIG, M. Curso de Física Básica: Eletromagnetismo. São Paulo: [s.n.], 2006. v. 3.

RIBEIRO, J. A. J. Propagação das Ondas Eletromagnéticas - Princípios e Aplicações. Porto Alegre: [s.n.], 2004. v.3.

SADIKU, M. N. O. Elementos de Eletromagnetismo. Porto Alegre: [s.n.], 2004. v.3.

TESLA, N. Apparatus for transmitting electrical energy. U.S., 1914.

WERICH, J. *Bezdratovy prenos energie*. 2016. Disponível em: <http://voltage.g6.cz/bezdratovy-prenos-energie.php>.

WITRICITY. *Witricity Technology*. 2016. Disponível em: <http://witricity.com/technology>.

Organização



UDESC
UNIVERSIDADE
DO ESTADO DE
SANTA CATARINA



UNISOCIESC
Educação e Tecnologia

Promoção



ABENGE
Associação Brasileira de Educação em Engenharia



PROTOTYPE OF A WIRELESS ENERGY TRANSMITTER AND RECEIVER

Abstract: *this paper presents a prototype of wireless transmitter and receptor developed during the Electromagnetic Conversion Course at Federal University of Piauí – UFPI. The prototype was developed by the students aiming to a better comprehension and a more easy way of teaching concepts and formulations of the laws that govern magnetism. This work presents a theoretical analysis, a study about the Resonance Coupling Technique for Wireless Energy Transfer, a final prototype, and a discussion about the results.*

Key-words: *Charger, Mutual inductance, wireless transmission.*