

TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA SEM FIO: ESTUDO E DEMONSTRAÇÃO PRÁTICA

I. Ávila, O. S. P. Pardinho, R. C. Silva, S. S. Santana, V. J. S. Santos, M. T. Coelho, L. F. Quintino, W. Oliveira e C. A. D. Piazza

Faculdade de Tecnologia Carlos Drummond de Andrade, Faculdade de Engenharia Eletrônica
irineu_avila@hotmail.com, black.01@itelefonica.com.br, 01renato30@gmail.com, silvia1808@outlook.com,
marcelct@uol.com.br, profvitorjss@gmail.com, luis.quintino@drummond.com.br, wesley.oliveira@drummond.com.br e
della_piazza@yahoo.com.br

Resumo: O objetivo deste trabalho é o estudo e a demonstração prática da possibilidade da transmissão de energia elétrica através do ar, sem utilização de fios ou condutores, utilizando uma plataforma magnética que por meio da indução eletromagnética permite um equipamento magnetizado corretamente forneça energia suficiente a outro equipamento, no qual mesmo sabendo que o ar não seja o melhor meio para se transmitir devida sua permissividade elétrica, o trabalho demonstra que uma vez magnetizado corretamente o meio, é possível a transmissão de energia de um lado para outro. Assim o sistema consiste basicamente em duas bobinas: uma na plataforma emissora de campo magnético e a outra bobina no equipamento receptor a ser ligado, gerando assim a indução de um campo eletromagnético, transformado assim em trabalho, e conseqüentemente em energia elétrica para utilização.

Palavras-chave - energia sem fio, permissividade elétrica, indução eletromagnética.

ELECTRICITY WIRELESS: THEORY AND PRACTICAL DEMONSTRATIONS

Abstract - The objective of this paper is study and practical demonstration of the possibility to transmission electricity through the air, without the use of cables or wires, using a magnetic platform through electromagnetic induction allows a magnetized equipment properly provide enough energy other equipment in which even though the air, that we know is not the best way to transmission due permittivity, the paper shows that once magnetized properly, it is possible the transmission energy from one side to another. Thus the system basically consists of two coils, one side with the platform station magnetic field and the other coil in the receiver side to be connected, thereby generating an induction electromagnetic field, thus produce work and, consequently, electrical energy for use.

Keywords - wireless power, electrical permittivity, electromagnetic induction.

I. INTRODUÇÃO

A proposta de transferência de eletricidade sem intermédio de fios atrai a humanidade há muito tempo, desde que Nikola Tesla escreveu em sua teoria de transmissão de corrente elétrica sem fio no fim do século XIX. O que Tesla pretendia não era, simplesmente, tornar acessível a todos o uso da energia elétrica. Sua capacidade de visão o levou a lutar por um ideal ainda mais abrangente: a transmissão de energia elétrica sem fios mediante um sistema que permitiria distribuí-la pelo mundo inteiro, fazendo com que ela passasse a ser propriedade da humanidade. As casas, fábricas, trens, aviões, submarinos, carros e barcos receberiam esta energia através de antenas que os conectariam as torres receptoras locais. Esta ideia apesar de absurda no começo mostrou totalmente necessária na atualidade. A energia elétrica está sempre presente no dia a dia. É utilizada em quase tudo o que nos cerca: automóveis, celulares e smartphones, TV, computador, eletrodomésticos em geral e para iluminação. Pensando em facilitar ainda mais o processo de transmissão de energia elétrica, pesquisadores tentaram desenvolver métodos de transmissão sem fio. Sabe-se que inúmeros métodos de transmissão de energia sem fio já foram testados. Muito provavelmente, o método mundialmente mais famoso de transmissão diz respeito ao uso de ondas radio magnéticas e produção de campo magnético através do ar. No entanto, tais radiações se dispersam em todas as direções, tornando completamente inviável o seu uso para a transmissão de energia, contrariamente à sua utilização para transmissão. Nesse contexto, o presente trabalho pretende demonstrar contextualmente a possibilidade da transmissão de energia elétrica sem fio, pelo ar, mostrando que uma vez magnetizado corretamente o meio de transmissão, pode-se transmitir energia no campo magnético que a envolve.

A. Justificativa e metodologia

A eletricidade facilita muito a nossa vida, mas temos que nos lidar com uma quantidade grande de fios para ligar vários aparelhos, e em caso de problemas em um determinado aparelho, muitas vezes temos que desligar todas as tomadas para alcançar o aparelho com problema. A possibilidade de no futuro podermos ter equipamentos independentes de fios, é necessariamente uma vantagem em termos de comodidade.

Para a realização deste projeto e para que atingíssemos os objetivos, foi necessário realizar um estudo sobre as funções a serem realizadas pelo protótipo. Foi pesquisado métodos para a realização do projeto tendo por base o uso de um circuito oscilador e bobinas indutoras. O desenvolvimento do



XIV CEEL - ISSN 2178-8308
03 a 07 de Outubro de 2016
Universidade Federal de Uberlândia - UFU
Uberlândia - Minas Gerais - Brasil

projeto foi dividido nas seguintes etapas: pesquisa relacionada a circuitos osciladores e a métodos de indução eletromagnéticos, análise para simulação do funcionamento do circuito, construção do circuito em placa de protótipo, realização de testes de funcionamento, confecção da placa permanente e teste final do funcionamento do sistema.

II. FUNDAMENTOS DA INDUÇÃO ELETROMAGNÉTICA

A partir dessa descoberta, o inglês Michael Faraday e o americano Joseph Henry dedicaram-se a obter o efeito inverso, ou seja, obter corrente elétrica a partir do campo magnético. A figura 1 mostra um dos dispositivos usados por Faraday. O enrolamento 1, chamado de primário, é uma bobina com N_1 espiras de condutor isolado e está conectada, através de uma chave interruptora, à bateria (fonte de tensão contínua). Esta bateria faz circular uma corrente contínua na bobina gerando um campo magnético. Este campo magnético é intensificado, pois as linhas de campo são concentradas pelo efeito do caminho magnético do núcleo de material ferromagnético de alta permeabilidade. As linhas de campo geradas pelo enrolamento 1 passam por dentro do enrolamento 2, chamado de secundário, que é uma bobina com N_2 espiras de condutor isolado. O secundário está monitorado por um galvanômetro que detectará qualquer corrente que circular no enrolamento. É importante salientar que não há contato elétrico entre os enrolamentos primário e secundário e nem destes com o material do núcleo, pois são bobinas feitas com condutores isolados.

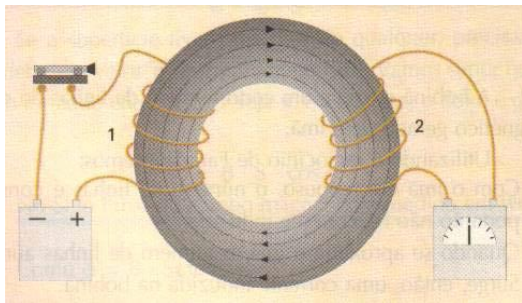


Fig. 1. Circuito para o Experimento de Faraday [3]

Durante 10 anos, Faraday tentou detectar corrente desta forma utilizando campos cada vez mais intensos e galvanômetros mais sensíveis, porém, não obteve sucesso. Em 1831, ao acionar sucessivas vezes a chave interruptora no circuito do enrolamento primário, Faraday resolveu o problema e fez as seguintes observações:

- No momento em que a chave é fechada, o galvanômetro acusa uma pequena corrente de curta duração, como indica a figura 2 (a);
- Após a corrente cessar e durante o tempo em que a chave ainda permanecer fechada, o galvanômetro não mais acusa corrente;
- Ao abrir-se a chave, o galvanômetro volta a indicar uma corrente de curta duração, em sentido oposto, como indica a figura 2 (b).

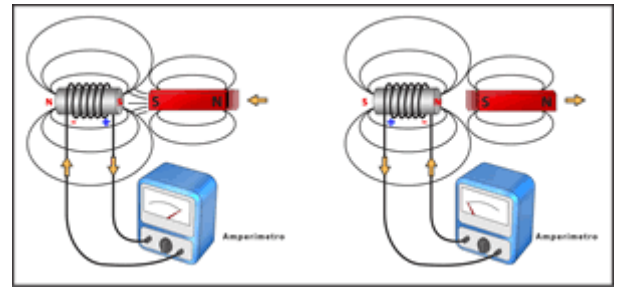


Fig. 2. Experimento de Faraday [3]

Esses três momentos podem ser explicados da seguinte maneira:

- Enquanto o campo magnético criado pela corrente no enrolamento primário cresce é gerada uma corrente no enrolamento secundário. Isso ocorre logo após a chave ser fechada, pois a corrente é crescente. Quando o campo no enrolamento primário se estabiliza (se torna constante) a corrente cessa no enrolamento secundário.
- Enquanto o campo magnético permanece constante no enrolamento primário, não há corrente no enrolamento secundário.
- Enquanto o campo magnético diminui no enrolamento primário, é gerada uma corrente no enrolamento secundário, com sentido oposto à anterior. Isso ocorre logo após a chave ser aberta e cessa logo após o campo magnético se anular no enrolamento primário.

Disso, Faraday concluiu: “A simples presença do campo magnético não gera corrente elétrica. Para gerar corrente é necessário variar fluxo magnético” [1].

O experimento de Faraday mostra que se em uma região próxima a um condutor, bobina ou circuito elétrico houver uma variação de fluxo magnético, aparecerá nos seus terminais uma diferença de potencial (ddp), chamada de força eletromotriz induzida (fem), ou simplesmente, tensão induzida. Caso o circuito elétrico esteja fechado, esta força eletromotriz induzida fará circular uma corrente elétrica induzida.

Michael Faraday enunciou a lei que rege este fenômeno, chamado de Indução Eletromagnética e que relaciona a tensão elétrica induzida (fem) devida à variação do fluxo magnético num circuito elétrico. A Lei de Faraday diz o seguinte:

“Em todo condutor enquanto sujeito a uma variação de fluxo magnético é estabelecida uma força eletromotriz (tensão) induzida”.

Ao estudar a lei de Faraday, o físico russo Heinrich Friedrich Lenz enunciou a lei que determina o sentido da corrente elétrica induzida em uma espira: “O sentido da corrente induzida é tal que origina um fluxo magnético induzido, que se opõe à variação do fluxo magnético indutor” [1].

Em 1845, Franz Ernst Neumann escreveu matematicamente a Lei de Faraday estabelecendo uma relação entre a força motriz e o fluxo magnético num determinado intervalo de tempo (equação 1).

$$e = - \frac{d\phi}{dt} \quad (1)$$

Em uma bobina, a tensão induzida é diretamente proporcional ao número de espiras como mostra a equação 2.

$$e = -N \frac{d\phi}{dt} \quad (2)$$

Onde:

e – força eletromotriz induzida (tensão induzida) [V]
 $d\phi/dt$ – taxa de variação do fluxo magnético no tempo [Wb/s]
 N – número de espiras.

Em 1873 James Clerk Maxwell, publicou seu “Tratado sobre Eletricidade e Magnetismo”, no qual, escreveu a lei do experimento de Faraday na forma diferencial.

$$\nabla \times E = - \frac{\partial B}{\partial t} \quad (3)$$

Através, da equação 3, temos que o rotacional do campo elétrico em cada ponto do espaço é igual ao oposto da derivada temporal do vetor densidade de fluxo magnético.

Máquinas elétricas como, por exemplo, geradores e motores, têm seu princípio de funcionamento baseado nas leis da indução.

A. Indutores

Um indutor é uma bobina composta por um fio condutor isolado (geralmente fio de cobre esmaltado) enrolado sobre um núcleo de ar ou de material ferromagnético (por exemplo, ferro doce ou ferrite). Os núcleos de ferro e de ferrite têm como objetivo reduzir a dispersão magnética das linhas de campo, pois esses materiais apresentam baixa relutância (resistência à passagem do fluxo magnético), ou seja, alta permeabilidade μ .

A indutância de um Indutor pode ser dada pela equação 4:

$$L = \frac{\mu N^2 A}{\ell} \quad (4)$$

Onde:

L – Indutância da bobina indutora, [Henry, H];
 A – área das espiras da bobina [metros quadrados, m^2];
 ℓ – comprimento longitudinal da bobina, [metros, m];
 μ - permeabilidade magnética do meio no núcleo da bobina [Henry por metro, H/m];
 N – número de espiras

Sabemos que Indutância é a capacidade que uma bobina tem de induzir tensão nela mesma quando submetida a uma variação de corrente. A Indutância de uma bobina é uma constante construtiva e depende, portanto:

- do número de espiras, N .
- da área das espiras, A em m^2 .
- do comprimento da bobina, ℓ em mm.
- da permeabilidade magnética do núcleo, μ em H/m.

A indutância depende inteiramente da construção física do circuito e pode somente ser medida com instrumentos especiais de laboratório. Dos fatores mencionados, um dos mais importantes é o número de espiras que afeta a

indutância de um indutor (ao quadrado). Dobrando o número de espiras se produz um fluxo magnético duplamente mais forte. Um campo duplamente mais forte corta duas vezes mais o número de espiras, induzindo quatro vezes a tensão. Então, concluímos que a indutância varia diretamente com o quadrado do número de espiras.

B. Oscilador Hartley

Num oscilador Hartley a realimentação é feita pela bobina de carga L . Este tipo de circuito funciona até algumas dezenas de Mega-Hertz. A frequência de um oscilador Hartley é dada pelo circuito ressonante LC como mostra a figura 3.

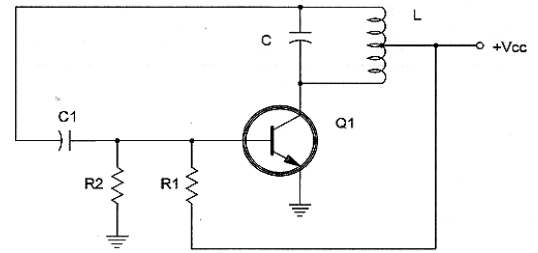


Fig. 3. Oscilador Hartley típico com transistor bipolar NPN. [1]

A bobina e o capacitor determinam a frequência de operação do oscilador, enquanto que o transistor é o elemento ativo que repõe a energia ao sistema.

A bobina possui uma derivação central ou próxima do centro de tal forma que tem se dois setores.

Um dos setores, ligado ao coletor do transistor, recebe toda a energia deste componente, sendo por isso denominado “carga”. É neste setor que realizamos a extração das oscilações, o que pode ser feito, por exemplo, por uma segunda bobina que faria o papel do secundário de um transformador.

O outro setor se encarrega de inverter a fase do sinal e aplicá-lo de volta à entrada do transistor. É importante observar que a frequência de um oscilador deste tipo está limitada pelo tempo que o sinal demora a voltar à entrada do transistor. Como existe uma capacitância entre a base e o emissor do transistor, ou seja, um capacitor que precisa ser carregado, quanto maior for seu valor mais tempo ele demora a iniciar a condução do sinal produzido.

A forma de onda de um oscilador deste tipo é teoricamente senoidal, no entanto, dependendo da frequência de operação e da existência de elementos parasitas no circuito, podem ocorrer deformações. A frequência de saída é dada pela equação 5.

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (5)$$

C. Ressonância

É o fenômeno que acontece quando um sistema físico recebe energia por meio de excitações de frequência igual a uma de suas frequências naturais de vibração. Assim, o sistema físico passa a vibrar com amplitudes cada vez maiores. Essa frequência é uma característica intrínseca de cada material. Se pensarmos em sistemas mais complexos,

como por exemplo, um carro, uma ponte ou uma corda de violão, observa-se a apresentação de muitas frequências naturais de vibração. Caso seja dada energia a um desses sistemas em uma de suas frequências naturais de vibração, eles irão oscilar intensamente.

Existem vários tipos de ressonância: mecânica, elétrica, magnética, etc. A ressonância magnética é gerada se a frequência de certo campo magnético for igual à frequência de ressonância magnética do corpo, então este corpo começará a vibrar.

III. FUNCIONAMENTO

O sistema de transmissão de energia elétrica através da indução magnética em modos ressonantes funcionam de uma forma bem simples, e necessita ter um aparelho que contenha bobinas emissoras de campo magnético e outro 2 aparelho que tenha bobinas receptoras deste campo [1]. Sabe-se que a intensidade da corrente elétrica gerada pelo efeito Joule da indução magnética depende do valor do campo magnético [2], então para transferir uma quantidade maior de energia entre duas bobinas, assim deve-se aumentar a intensidade do campo magnético.

O sistema de transmissão de energia elétrica através da indução magnética e modos ressonantes funcionam de forma bem simples, e necessita ter um aparelho que contenha bobinas emissoras de campo magnético e outro aparelho que tenha bobinas receptoras deste campo.

Na figura 4 temos um exemplo deste tipo de sistema. O dispositivo emissor está ligado à rede elétrica. As linhas azuis próximas representam o campo magnético induzido pela fonte de energia. As linhas amarelas representam o fluxo de energia a partir da fonte para a bobina de captura, onde está ligada uma lâmpada. Note que este diagrama também mostra como o campo magnético (linhas azuis) pode envolver em torno de um obstáculo entre a fonte de alimentação e o dispositivo de captura.

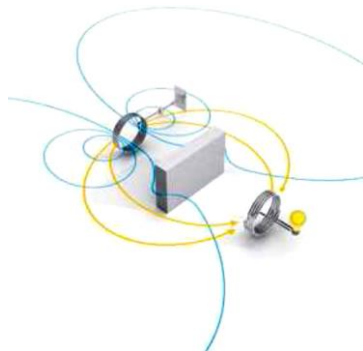


Fig. 4. Exemplo de sistema de transmissão.

Sabe-se que a intensidade da corrente elétrica gerada pelo efeito da indução magnética depende do valor do campo magnético, então para transferir uma quantidade maior de energia entre duas bobinas, deve-se aumentar a intensidade do campo magnético. Mas, como o campo magnético se dispersa facilmente em todas as direções pelo ar, seria um desperdício fazer a transferência desta forma. Porém, em novembro de 2006, um grupo de pesquisadores do M.I.T (Massachusetts Institute of Technology), liderado por Marin

Soljagic, demonstrou que a ressonância eletromagnética seria a solução para este problema. Isso se deve ao fato da indução poder acontecer de maneira diferente se os campos eletromagnéticos em volta das bobinas ressoarem na mesma frequência, atuando como um sistema único e acoplado, portanto, aumentando a eficiência da transferência de energia. Ou seja, se a frequência do campo magnético variante for igual à frequência de ressonância do material, então eles atuarão como um sistema só, minimizando as perdas [4].

IV. PARTE EXPERIMENTAL

Para tornar o sistema prático para montagem experimental foi escolhida a transferência de energia por meio de campos magnéticos, ou seja, por indução magnética. A escolha do tema abordado com o módulo se deu pela análise de um cenário em que a utilização da energia elétrica muitas vezes é dificultada não pela indisponibilidade deste recurso, mas pelas restrições de mobilidade e durabilidade implicadas pela utilização de cabos de alimentação e baterias.

Estes fatores contribuem para o incentivo de pesquisas voltadas ao desenvolvimento de sistemas que buscam formas alternativas para se contornar tais situações, como a transmissão de eletricidade através de ondas eletromagnéticas utilizando acoplamento magnético de circuitos ressonantes. O desenvolvimento do projeto foi dividido nas seguintes etapas: pesquisa relacionada a circuitos osciladores e a métodos de indução eletromagnéticos, análise para simulação do funcionamento do circuito, construção do circuito em placa de protótipo, realização de testes de funcionamento, confecção da placa permanente, teste final do funcionamento do sistema.

Quanto às cargas, foram construídos alguns receptores, possibilitando acionar alguns leds, um motor e um carregador de celular. Para facilitar o ajuste da ressonância entre os circuitos, utilizaram-se capacitores variáveis junto às bobinas dos circuitos receptores.

A. Circuito elétrico

A seguir na figura 5 podemos ver o circuito elétrico utilizado para o desenvolvimento do projeto.

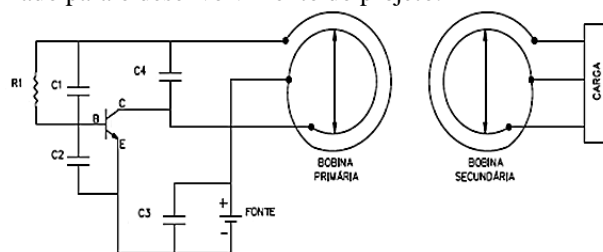


Fig. 5. Circuito elétrico.

O circuito desenvolvido é um oscilador Hartley. Como explicado anteriormente, o resistor na base do transistor faz a polarização, e o capacitor C1 faz a realimentação. Quando o circuito é ligado, o transistor é energizado pela base próximo a saturação, e assim passa a conduzir corrente. A corrente que circula da fonte até o coletor, é liberada para a bobina primária. Já a corrente na bobina primária é induzida até a metade da bobina, e assim essa corrente é aplicada novamente para a base do transistor através do capacitor C1.

Para construir o circuito utilizamos o transistor BD139 que é um transistor NPN de média potência.

B. Construção das bobinas (Indutores)

A fim de se obter os melhores resultados foram construídas varias bobinas diferentes. Verificando assim qual a bitola e tamanho do fio, quantas voltas utilizar nas bobinas para melhor eficiência. As bobinas da figura 6 foram construídas com fio de cobre esmaltado.



Fig. 6. Bobinas.

V. RESULTADOS

Como resultado da experiência do trabalho, constata-se então, através de testes, que à medida que se afasta a bobina secundária da bobina primária, aumentando distância entre elas (maior entreferro), a intensidade da corrente elétrica vai diminuindo, ou seja, quanto maior é a distância, menor será o aproveitamento e a eficácia, pois o entreferro criado e resistência do ar são muito grande, devido sua permissividade elétrica ($\epsilon = 8,8541878176 \times 10^{-12}$ F/m), a permissividade é determinada pela habilidade de um material de se polarizar em resposta a um campo elétrico aplicado e, dessa forma, cancelar parcialmente o campo dentro do material. Como o meio ambiente ar, oferece uma resistência muito grande a passagem de corrente elétrica, e consequentemente a produção de trabalho e potência elétrica, quanto maior é a distância, maior será a tensão na alimentação para manter a intensidade do campo magnético, e uma tensão elevada, por resultado aumenta o campo magnético, porém aumentar o campo magnético, pode afetar outros equipamentos situados no mesmo ambiente, através de interferências eletromagnéticas em campos concorrentes.

A. Teste comparativo entre bobinas

Para a realização do teste foram adotadas as seguintes condições:

Tensão de alimentação do circuito elétrico: 12 V;

- Circuito elétrico montado no protoboard;
- Diâmetro do fio da bobina primária: 1 mm e 6 mm;
- Diâmetro da bobina primária: 100 mm/2voltas;
- Diâmetro do fio da bobina secundária: 0,64 mm;
- Diâmetro da bobina secundária: 100 mm/ 25 voltas.

Conforme parâmetros referidos acima se fez um comparativo entre uma bobina primária com um fio de diâmetro mais fino e outra com um fio de diâmetro maior,

mantendo a tensão da fonte constante e a bobina secundária igual para as duas condições.

Assim foram realizadas algumas medições de corrente, aumentando a distância e mantendo a tensão constante em 12 V, para os dois tipos de bobina primária, com diâmetro de 1 mm e 6 mm, os valores coletados são apresentados nas tabelas 1 e 2.

Tabela I- Dados obtidos com bobina de fio de 1 mm

Distância (cm)	Corrente (mA)
2	10,9
3	8,7
4	6,7
5	6
6	3,6
8	2
10	1,3

Tabela II- Dados obtidos com bobina de fio de 6 mm

Distância (cm)	Corrente (mA)
2	17,9
3	11,68
4	10,06
5	6,75
6	5,87
8	4,58
10	2,29

Constata-se então, através dos testes, que a medida que afasta-se a bobina secundária da bobina primária, aumentando distância entre elas, a intensidade da corrente elétrica vai diminuindo, ou seja, quanto maior é a distância, menor será o aproveitamento e a eficácia. Também foi possível perceber que utilizando uma bobina primária com um diâmetro do fio maior, teremos valores de intensidade da corrente elétrica superiores se comparada com um fio de diâmetro menor.

Com o resultado dos testes realizados, verifica-se que para uma melhor eficiência de transmissão de energia elétrica sem fio é necessário que a bobina primária tenha um fio de diâmetro maior que a bobina secundária, e que elas tenham o mesmo tamanho e estejam mais próximas e alinhadas possíveis.

Quanto maior é a distância, maior terá que ser a tensão de alimentação, e uma tensão elevada aumenta o campo magnético, porém aumentar o campo magnético, pode afetar outros equipamentos situados no mesmo ambiente.

VI. PROTÓTIPO FINAL

Para atender estética do protótipo foi idealizado um formato em "L" de modo a se visualizar tanto a bobina como a placa. O circuito elétrico mostrado na figura 5 foi montado na placa, conectada a bobina primária com fio de diâmetro 6 mm, com um diâmetro interno de 6 cm com 2 voltas, ligada a um fonte de tensão continua de 12V, e colocada dentro de uma plataforma de madeira conforme mostra a figura 7.



Fig. 7. Aspecto físico do protótipo final.

VII. CONCLUSÕES

A partir do trabalho realizado e dentro dos objetivos iniciais, ficou demonstrada na prática que é possível, a transferência de energia elétrica pelo ar, sem uso de fios, baseada no princípio da indução eletromagnética e magnetização de materiais, no qual uma vez magnetizado corretamente o meio, polariza o material pelos campos magnéticos criados ao seu redor.

Inúmeras vantagens podem ser alcançadas pelo uso dessa tecnologia, entre elas destacam-se o acionamento de vários aparelhos simultaneamente, pois afinal, com o campo magnético, torna-se fácil colocar vários dispositivos sendo alimentados, ainda podemos destacar a maior mobilidade causada pela não utilização dos fios condutores eliminando

também os riscos de choques elétricos por entrar em contato com eles. Esse sistema deve se tornar cada vez mais presente no cotidiano, pois várias empresas se aliaram em grandes grupos para desenvolver essa tecnologia. Um desses grupos é o Wireless Power Consortium (WPC) que tem como membros empresas como a Samsung, Microsoft, Toshiba, Toyota, entre outras. Outro grupo Alliance For Wireless Power (A4WP) tem como membros a Acer, Intel, HP, etc. Como essa tecnologia possui ainda algumas desvantagens, como por exemplo, não ser tão eficiente para longas distâncias, o que torna sua aplicação em situações bem limitadas. Teremos que esperar um pouco, mas a transferência de energia sem fio está sendo aprimorada, buscando ser a forma de transferência de energia do futuro.

BIBLIOGRAFIA E REFERÊNCIAS

- [1] BOYLESTAD, Robert L. e Nashelsky, L.. Dispositivos eletrônicos e teoria de circuitos. Rio de Janeiro: Prentice-Hall do Brasil. 8ª Edição 2004.
- [2] FITZGERALD, A. E., Charles Kingsley Jr., Stephen D. Umans, Maquinas elétricas- Com introdução a eletrônica de potência. Porto Alegre: Bookman. 6ª edição 2006.
- [3] MUSSOI, prof. Fernando Luiz Rosa. Apostila: Fundamentos do eletromagnetismo. Florianópolis: CEFET/SC. Agosto, 2007.
- [4] NOTAROS, Branislav M.. Eletromagnetismo [tradução: Lara Freitas]. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2012.