

# Energia Elétrica e Sustentabilidade 2

Jaqueline Oliveira Rezende  
(Organizadora)



**Atena**  
Editora

Ano 2018

**JAQUELINE OLIVEIRA REZENDE**

(Organizadora)

# **Energia Elétrica e Sustentabilidade**

## **2**

Atena Editora  
2018

2018 by Atena Editora

Copyright © da Atena Editora

**Editora Chefe:** Profª Drª Antonella Carvalho de Oliveira

**Diagramação e Edição de Arte:** Geraldo Alves e Natália Sandrini

**Revisão:** Os autores

#### **Conselho Editorial**

Prof. Dr. Alan Mario Zuffo – Universidade Federal de Mato Grosso do Sul  
Prof. Dr. Álvaro Augusto de Borba Barreto – Universidade Federal de Pelotas  
Prof. Dr. Antonio Carlos Frasson – Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
Prof. Dr. Antonio Isidro-Filho – Universidade de Brasília  
Profª Drª Cristina Gaio – Universidade de Lisboa  
Prof. Dr. Constantino Ribeiro de Oliveira Junior – Universidade Estadual de Ponta Grossa  
Profª Drª Daiane Garabeli Trojan – Universidade Norte do Paraná  
Profª Drª Deusilene Souza Vieira Dall’Acqua – Universidade Federal de Rondônia  
Prof. Dr. Eloi Rufato Junior – Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
Prof. Dr. Fábio Steiner – Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul  
Prof. Dr. Gianfábio Pimentel Franco – Universidade Federal de Santa Maria  
Prof. Dr. Gilmei Fleck – Universidade Estadual do Oeste do Paraná  
Profª Drª Girlene Santos de Souza – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia  
Profª Drª Ivone Goulart Lopes – Istituto Internazionele delle Figlie de Maria Ausiliatrice  
Prof. Dr. Julio Candido de Meirelles Junior – Universidade Federal Fluminense  
Prof. Dr. Jorge González Aguilera – Universidade Federal de Mato Grosso do Sul  
Profª Drª Lina Maria Gonçalves – Universidade Federal do Tocantins  
Profª Drª Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte  
Profª Drª Paola Andressa Scortegagna – Universidade Estadual de Ponta Grossa  
Profª Drª Raissa Rachel Salustriano da Silva Matos – Universidade Federal do Maranhão  
Prof. Dr. Ronilson Freitas de Souza – Universidade do Estado do Pará  
Prof. Dr. Takeshy Tachizawa – Faculdade de Campo Limpo Paulista  
Prof. Dr. Urandi João Rodrigues Junior – Universidade Federal do Oeste do Pará  
Prof. Dr. Valdemar Antonio Paffaro Junior – Universidade Federal de Alfenas  
Profª Drª Vanessa Bordin Viera – Universidade Federal de Campina Grande  
Prof. Dr. Willian Douglas Guilherme – Universidade Federal do Tocantins

<b>Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)</b> <b>(eDOC BRASIL, Belo Horizonte/MG)</b>	
E56	Energia elétrica e sustentabilidade 2 [recurso eletrônico] / Organizadora Jaqueline Oliveira Rezende. – Ponta Grossa (PR): Atena Editora, 2018. – (Energia Elétrica e Sustentabilidade; v. 2)  Formato: PDF Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader Modo de acesso: World Wide Web Inclui bibliografia ISBN 978-85-85107-46-8 DOI 10.22533/at.ed.468180110  1. Desenvolvimento energético – Aspectos ambientais. 2. Desenvolvimento sustentável. 3. Energia elétrica. I. Rezende, Jaqueline Oliveira.  CDD 338.4
<b>Elaborado por Maurício Amormino Júnior – CRB6/2422</b>	

O conteúdo do livro e seus dados em sua forma, correção e confiabilidade são de responsabilidade exclusiva dos autores.

2018

Permitido o download da obra e o compartilhamento desde que sejam atribuídos créditos aos autores, mas sem a possibilidade de alterá-la de nenhuma forma ou utilizá-la para fins comerciais.

[www.atenaeditora.com.br](http://www.atenaeditora.com.br)

## APRESENTAÇÃO

A sustentabilidade pode ser entendida como a capacidade de o ser humano utilizar os recursos naturais para satisfazer as suas necessidades sem comprometer esses recursos para atender as gerações futuras. Nesse contexto, a sustentabilidade está inter-relacionadas em diversos setores, sendo os principais o social, o ambiental e o econômico. Dessa forma, constitui um dos desafios da sociedade moderna o desenvolvimento sustentável que objetiva preservar o meio ambiente durante a realização de outras atividades.

A energia elétrica representa um dos principais pilares para o progresso econômico de uma nação e, conseqüentemente, para o atendimento de inúmeras necessidades da humanidade. Portanto, esse setor também tem se preocupado com a geração, a transmissão, a distribuição de energia elétrica e a construção de novos empreendimentos, como as usinas hidrelétricas, de maneira a preservar o meio ambiente. Logo, a Engenharia Elétrica tem apresentado significativas pesquisas e resultados de ações pautadas na sustentabilidade.

Neste ebook é possível notar que a relação da Engenharia Elétrica e a Sustentabilidade é de preocupação de diversos profissionais envolvidos nesse setor, sendo esses advindos da academia, das concessionárias de energia elétrica e do governo. Dessa forma, são apresentados trabalhos teóricos e resultados práticos de diferentes formas de aplicação da preservação do meio ambiente na engenharia elétrica.

Inicialmente são apresentados artigos que discorrem sobre o desenvolvimento sustentável e a sustentabilidade ambiental, custos ambientais em empreendimentos de geração de energia elétrica, recuperação ambiental, conservação da fauna, políticas administrativas e direcionamento de resíduos eletrônicos.

Em seguida, são descritos estudos sobre formas de geração de energia elétrica renováveis não convencionais, sendo apresentadas a energia eólica e a energia solar fotovoltaica. Essas formas de geração contribuem para o desenvolvimento sustentável, uma vez que geram energia elétrica utilizando recursos naturais não finitos, o vento na geração eólica e o sol na geração fotovoltaica.

Além disso, neste exemplar são expostos artigos que contemplam diversas áreas da engenharia elétrica, como redes smart grids, sistema de proteção, operação remota de usinas hidrelétricas, inteligência computacional aplicada a usina termelétrica, transformadores de potência, linhas de transmissão, tarifa horária, lâmpadas led, prevenção de acidentes em redes de média tensão e eficiência energética.

**Jaqueline Oliveira Rezende**

## SUMÁRIO

<b>CAPÍTULO 1</b> .....	<b>1</b>
PROSPECÇÃO DE PARQUES HIDROKINÉTICOS ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE PROJETOS NOS RIOS IGUAÇU E PARANÁ	
<i>Marcos Aurélio de Araujo</i>	
<b>CAPÍTULO 2</b> .....	<b>10</b>
TROCADOR DE CALOR – INOVAÇÃO NO AQUECIMENTO DE ÁGUA, FUNCIONAMENTO, RESULTADOS E COMPARAÇÃO COM TECNOLOGIAS SEMELHANTES	
<i>Odair Deters</i>	
<i>Paulo Valdocci Pereira</i>	
<i>Valério Monteiro</i>	
<b>CAPÍTULO 3</b> .....	<b>23</b>
SISTEMA ÓPTICO CWDM COMO PLATAFORMA DE MONITORAÇÃO DE ATIVOS E DE COMUNICAÇÃO DE DADOS PARA REDES SMART GRIDS	
<i>João Batista Rosolem</i>	
<i>Danilo César Dini</i>	
<i>Claudio Antonio Hortêncio</i>	
<i>Eduardo Ferreira da Costa</i>	
<i>Rivael Strobel Penze</i>	
<i>João Paulo Vicentini Fracarolli</i>	
<i>Carlos Alexandre Meireles Nascimento</i>	
<i>Vítor Faria Coelho</i>	
<b>CAPÍTULO 4</b> .....	<b>37</b>
PORTAL OPERACIONAL DE EQUIPAMENTOS ESPECIAIS DA REDE DE DISTRIBUIÇÃO - UMA FERRAMENTA PARA GESTÃO DA CONFORMIDADE E DA CONTINUIDADE NO FORNECIMENTO DE ENERGIA ELÉTRICA	
<i>Rafael Cassiolato de Freitas</i>	
<i>Sadi Roberto Schiavon</i>	
<b>CAPÍTULO 5</b> .....	<b>46</b>
MODERNIZAÇÃO DOS SISTEMAS DE PROTEÇÃO, CONTROLE E SUPERVISÃO DA USINA HIDRELÉTRICA DE SAMUEL	
<i>Davi Carvalho Moreira</i>	
<i>Daniel Simões Pires</i>	
<i>Danilo Gomes Matias</i>	
<i>Heleno Fülber</i>	
<i>Bruno Merlin</i>	
<b>CAPÍTULO 6</b> .....	<b>62</b>
OPERAÇÃO REMOTA DE USINAS PELO CENTRO DE OPERAÇÃO DA GERAÇÃO DA ELETROBRAS ELETRONORTE	
<i>Davi Carvalho Moreira</i>	
<i>Daniel Simões Pires</i>	
<i>Danilo Gomes Matias</i>	
<i>Juliano Cortes de Souza</i>	
<i>Leonardo Siqueira Rodrigues</i>	
<i>Heleno Fülber</i>	
<i>Bruno Merlin</i>	
<b>CAPÍTULO 7</b> .....	<b>70</b>
ABORDAGEM DE INTELIGÊNCIA COMPUTACIONAL APLICADA PARA MODELAGEM PREDITIVA DE EMISSÕES DE NOX E CO DE UMA TURBINA A GÁS DE UMA USINA TERMELÉTRICA DE CICLO COMBINADO	
<i>Eduardo Massashi Yamao</i>	
<i>Juliano Pierezan</i>	

*João Paulo Silva Gonçalves*  
*Marcos Cesar Gritti*  
*Luís Gustavo Tomal Ribas*  
*Flávio Chiesa*  
*Victor Manuel Lopes dos Santos*  
*Marcos de Freitas*  
*André da Silva Orlandi*  
*Leandro dos Santos Coelho*

**CAPÍTULO 8 ..... 82**

CONFIRMAÇÃO DA EFICÁCIA DO ENSAIO DE RESPOSTA DO DIELÉTRICO DE TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA E BUCHAS CAPACITIVAS COMO TÉCNICA DE MANUTENÇÃO PREDITIVA

*Hugo Rafael Freitas Negrão*  
*Fernando de Souza Brasil*  
*Bárbara Medeiros Campos*  
*Maria Emília de Lima Tostes*  
*Jorge Augusto Siqueira Tostes*  
*Paulo Roberto Moutinho de Vilhena*

**CAPÍTULO 9 ..... 96**

A EXPERIÊNCIA DA ELETRONORTE NA IMPLANTAÇÃO DA ANÁLISE DE RESPOSTA EM FREQUÊNCIA PARA DIAGNÓSTICO DE REATORES E TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA

*Vanessa de Cássia Viana Martins Beltrão*

**CAPÍTULO 10 ..... 113**

ANÁLISE DE DESEMPENHO DA LINHA DE TRANSMISSÃO 230 KV DO SISTEMA DE TRANSMISSÃO DE RONDÔNIA OPERANDO COM CABOS PARA-RAIOS ISOLADOS E ENERGIZADOS EM MÉDIA TENSÃO

*José Ezequiel Ramos*  
*Alexandre Piantini*  
*Ary D'Ajuz*  
*Valdemir Aparecido Pires*  
*Paulo Roberto de Oliveira Borges*

**CAPÍTULO 11 ..... 126**

ESTUDO DE APLICAÇÃO DO DISPOSITIVO SVC NA LINHA DE TRANSMISSÃO MESQUITA VIANA II

*Alcebíades Rangel Bessa*  
*Lucas Frizera Encarnação*  
*Paulo José Mello Menegáz*

**CAPÍTULO 12 ..... 143**

IMPLANTAÇÃO DA LINHA DE TRANSMISSÃO SUBTERRÂNEA 230KV CIRCUITO DUPLO DA COPEL

*Márcio Tonetti*  
*Ilmar da Silva Moreira*  
*João Nelson Hoffmann*

**CAPÍTULO 13 ..... 153**

TRANSMISSÃO DE ENERGIA SEM FIO: ESTUDO POR INDUÇÃO ELETROMAGNÉTICA E ACOPLAMENTO MAGNÉTICO RESSONANTE

*Guilherme Hideki Shibukawa*  
*Eric Eduardo Goveia Pandolfo*  
*Ricardo Andreola*  
*Emerson Charles Martins da Silva*

**CAPÍTULO 14 ..... 168**

TARIFAS HORÁRIAS PARA SISTEMA DE TRANSMISSÃO CONSIDERANDO O SINAL LOCACIONAL

*Marcio Andrey Roselli*  
*André Meister*

*Denis Perez Jannuzzi  
Robson Kuhn Yatsu  
André Veiga Gimenes  
Miguel Edgar Morales Udaeta*

**CAPÍTULO 15..... 178**

AVALIAÇÃO DAS LÂMPADAS LED NO MERCADO BRASILEIRO (ARTIGO APRESENTADO NO XXIV SNPTEE)

*Alessandra da Costa Barbosa Pires de Souza  
Maurício Barreto Lisboa  
Willians Felipe de Oliveira Rosa*

**CAPÍTULO 16..... 185**

AVALIAÇÃO DO MÉTODO INDEPENDENTE DE MEDIÇÃO DE PERTURBAÇÕES RADIADAS – ANEXO B DA CISPR 15 (ARTIGO APRESENTADO NO XXIV SNPTEE)

*Alessandra da Costa Barbosa Pires de Souza  
Maurício Barreto Lisboa  
Willians Felipe de Oliveira Rosa*

**CAPÍTULO 17 ..... 193**

PADRÕES DE QUALIDADE PARA SERVIÇOS DE PINTURA ANTICORROSIVA APLICADOS AO SETOR ELÉTRICO

*Alberto Pires Ordine  
Cristina da Costa Amorim  
Marcos Martins de Sá  
Elber Vidigal Bendinelli*

**CAPÍTULO 18..... 209**

AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO, PRODUTIVIDADE E CUSTOS DE TECNOLOGIAS DE PROTEÇÃO ANTICORROSIVA PARA ESTRUTURAS ENTERRADAS DE LINHAS DE TRANSMISSÃO

*Cristina da Costa Amorim  
Alberto Pires Ordine  
Marcos Martins de Sá  
Wendell Porto de Oliveira*

**CAPÍTULO 19..... 221**

ANÁLISE DE QUASE-ACIDENTES, OCORRIDOS NA ATIVIDADE DE MANUTENÇÃO DE REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA DE MÉDIA TENSÃO, COMO MEIO EFICAZ E PROATIVO NA PREVENÇÃO DE ACIDENTES

*Cristiano José Gober  
Cresencio Silvio Segura Salas*

**CAPÍTULO 20..... 235**

PORTAL R3E COMO FERRAMENTA INDUTORA E DISSEMINADORA DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM EDIFICAÇÕES

*Clara Ovídio de Medeiros Rodrigues  
Marcelo Bezerra de Melo Tinoco  
Aldomar Pedrini  
Edison Alves Portela Junior  
João Queiroz Krause  
Marco Aurélio Ribeiro Gonçalves Moreira  
Fernando Pinto Dias Perrone*

**CAPÍTULO 21..... 246**

HIERARQUIA DAS NECESSIDADES E RESILIÊNCIA NO PAGAMENTO DE SERVIÇOS PÚBLICOS UTILIZADOS: UM ESTUDO DE CASO VOLTADO A ENERGIA ELÉTRICA RESIDENCIAL

*Ana Lúcia Rodrigues da Silva  
Fernando Amaral de Almeida Prado Jr.  
Carolina Rodrigues de Almeida Prado*

**CAPÍTULO 22 ..... 258**

PROJETO PILOTO PARCELAMENTO PRÓ-ATIVO DE DÉBITOS DE IRREGULARIDADE

*Diego Rivera Mendes*

*Julio Eloi Hofer*

*Rafael Luís de Avila*

**CAPÍTULO 23 ..... 267**

MODELAGEM ESTRATÉGICA PARA A CARACTERIZAÇÃO DAS CONDIÇÕES DE ANTECIPAÇÃO DO ATENDIMENTO AO CLIENTE PARA A MELHORIA OPERACIONAL E DE SERVIÇOS

*Carlos Alberto Fróes Lima*

*Anderson Diego Machiaveli*

*Luciano E. A. Peres*

*Tales Neves Anarelli*

**SOBRE A ORGANIZADORA ..... 287**



## TRANSMISSÃO DE ENERGIA SEM FIO: ESTUDO POR INDUÇÃO ELETROMAGNÉTICA E ACOPLAMENTO MAGNÉTICO RESSONANTE

**Guilherme Hideki Shibukawa**

Centro Universitário de Maringá – UNICESUMAR  
Maringá/PR

**Eric Eduardo Goveia Pandolfo**

Centro Universitário de Maringá – UNICESUMAR  
Maringá/PR

**Ricardo Andreola**

Centro Universitário de Maringá – UNICESUMAR  
Maringá/PR

**Emerson Charles Martins da Silva**

Instituto de Tecnologia Emerson Martins - ITEM  
Maringá/PR

**RESUMO:** A ideia de se eliminar as linhas físicas também na transmissão de energia, assim como é feito na transmissão de dados, era um sonho da tecnologia que já está sendo realizado. Estudos sobre a transmissão de energia sem fio já foram realizados há muitos anos. Um mundo sem cabos já foi pensado por Nikola Tesla, um cientista croata do século XIX que tentou sem sucesso a construção de uma torre emissora de energia elétrica para toda a cidade em que vivia na época (TESLA, 2015). Tesla não concretizou seu propósito, porém, estava no caminho certo. Por meio do fundamento em artigos, teses, dissertações e livros, este projeto apresenta o desenvolvimento e a aplicação dos princípios de funcionamento da transmissão de energia sem fio com base

nos conceitos de indução eletromagnética e acoplamento magnético ressonante. Para isso, foram elaborados dois protótipos de transmissão de energia sem fio, dos quais, um representa a indução eletromagnética e, o outro, ressonância acoplada magneticamente. Cada protótipo contém o seu respectivo circuito transmissor e receptor composto por uma bobina. Nos testes de eficiência dos protótipos foi comprovado que a transmissão de energia do circuito ressonante é muito mais eficaz, constatando uma distância máxima de detecção de campo magnético de até 50 cm entre uma bobina e outra. No entanto, estes foram testes em pequena escala. Deste modo, é possível cogitar uma casa na qual os aparelhos eletrodomésticos não dependam da utilização de fios na alimentação elétrica.

**PALAVRAS-CHAVE:** Indução; eletromagnetismo; ressonância.

**ABSTRACT:** The idea of eliminating the physical lines also in power transmission, how it is done with data transmission, was a dream of technology, which is already being accomplished. Studies about wireless power transmission were made many years ago. A world without wires has been designed by Nikola Tesla, a Croatian scientist of the nineteenth century who tried unsuccessfully to build an electricity station tower for the whole city which he lived at the time (TESLA, 2015). Tesla has not made his purpose,

however, was on the right way. Through research on articles, theses, dissertations and books, the goal of this project is to develop and apply the principles of operation of the wireless power transmission based on the concepts of electromagnetic induction and resonant magnetic coupling. For this, two wireless power transmission prototypes were developed, which one of those is the electromagnetic induction and the other coupled magnetically resonance. Each prototype has its respective transmitter and receiver circuit that contains a coil. In the prototype efficiency tests it was proved that the power transmission resonant circuit is much more effective, resulting a maximum magnetic field detection distance up to 50 cm between one coil to another. However, these were a small scale tests. Therefore, it is possible to suppose a house where the appliances will not depend on wires in the power supply.

**KEYWORDS:** Induction; electromagnetism; resonance.

## 1 | INTRODUÇÃO

No passado, em uma residência familiar existiam poucos eletrodomésticos que necessitavam ser conectados a uma tomada de alimentação elétrica. Nos dias atuais, este número de eletrodomésticos vem crescendo exponencialmente. Como um efeito disso, evidentemente, a demanda por cabos também se tornou elevada. Com vistas à proteção do meio ambiente e a uma maior comodidade na utilização dos eletrodomésticos, uma indagação que surge é a seguinte: Seria possível reduzir a quantidade de cabos utilizados na alimentação elétrica dos aparelhos?

Com o conceito de transmissão de energia sem fio, a resposta é sim. Este é o propósito do presente trabalho. Foi realizado um estudo a respeito da transmissão de energia elétrica sem fio, utilizando os conceitos de indução eletromagnética (indução mútua) e acoplamento indutivo ressonante.

No princípio do século XIX já se sabia que era possível, a partir de um fenômeno elétrico, obter uma manifestação magnética. A partir disso, surge a seguinte indagação: se utilizando a eletricidade cria-se um campo magnético, seria possível o processo inverso, ou seja, a partir do magnetismo, obter um fenômeno elétrico?

Quem solucionou este problema foi o químico e físico Michael Faraday. Após uma série de experimentos, Faraday chegou à seguinte conclusão: se temos um circuito elétrico em um campo magnético variável, uma corrente elétrica será induzida neste circuito e percorrerá o fio que forma este circuito, definindo assim a indução eletromagnética (Blundell, 2012). É possível reproduzir em um experimento essa verificação de Faraday, que utiliza dois solenoides de um material condutor.

O primeiro (espira 1) é conectado a uma fonte de tensão de corrente contínua e a uma chave de retenção; o segundo (espira 2) é conectado a um amperímetro. Considerando inicialmente que a chave está aberta, após o fechamento, o amperímetro revela a passagem de uma corrente por determinado tempo, até a estabilização do campo magnético. Ao abrir esta chave, é passada uma corrente pelo amperímetro

novamente, porém, no sentido contrário. A corrente que passa pelo amperímetro é alternada, visto que hora a corrente flui em um sentido, hora no outro. É importante destacar que pelo solenoide 2 passa uma corrente elétrica, sendo criada uma diferença de potencial (ddp). Faraday denominou esta ddp de força eletromotriz induzida (BLUNDELL, 2012).

Com os dados obtidos por Faraday, o cientista Nikola Tesla teve a ideia de transmitir energia sem a utilização de um fio. No século XIX ele conseguiu acender uma lâmpada de baixa potência por indução eletromagnética (TESLA, 2012).

Ao ter partículas carregadas (elétrons) em movimento em um fio, produz-se um campo magnético em torno do mesmo. Este foi o primeiro conceito utilizado para se transmitir energia sem a utilização de um fio. Deste modo, aplicando-se uma corrente alternada em uma bobina primária, é possível transferir a energia para uma bobina próxima (secundária) através do campo magnético criado (Halliday, 2013). De acordo com Braga (2014), esta tecnologia é bastante utilizada nos transformadores em geral. Para melhor direcionamento das linhas de campo é utilizado um núcleo ferromagnético, pois na indução eletromagnética há uma grande perda de energia pelo fato das linhas de campo se dispersarem em todas as direções.

Estudos realizados por um grupo de pesquisa do *Massachusetts Institute of Technology* (MIT), liderado por Marin Soljacic decifrou este problema usando o conceito de ressonância acoplada magneticamente, com uma grande taxa de eficiência. Futuramente, este grupo de pesquisa estaria fundando uma empresa conhecida pela transmissão de energia sem fio, chamada *Witricity* (WITRICITY 2015).

De acordo com Witricity (2015), a ressonância acontece quando uma energia é transferida a um corpo físico, atingindo a frequência natural de vibração do material ao qual a ressonância acontece. Com isto, este objeto passará a vibrar intensamente e a amplitude tende a aumentar. Como citado por Faraday, o acoplamento magnético pode ser entendido quando dois objetos trocam energia por meio do campo magnético variante, emitido pela bobina primária (Blundell, 2012). Já o acoplamento ressonante, ocorre quando as frequências naturais de dois corpos são muito próximas.

Como citado por Sadiku (2013), um capacitor em paralelo com um indutor, possui uma frequência natural de oscilação ( $f_0$ ) e, quando energizados por uma fonte de corrente alternada com a mesma frequência  $f_0$ , obtêm-se a ressonância, onde há maior transferência de energia. Para isso, as reatâncias capacitivas e indutivas devem ter o mesmo valor, em módulo. Para determinar a frequência natural de oscilação do conjunto LC (capacitor e indutor em paralelo), deduz-se a seguinte fórmula:

$$X_C = X_L$$

Onde:  $X_C$  é a reatância capacitiva;

$X_L$  é a reatância indutiva.

$$\frac{1}{2.\pi.f_o.C} = 2.\pi.f_o.L$$

$$f_o = \frac{1}{2.\pi.\sqrt{L.C}} \quad (1.1)$$

Onde: C é a capacitância;

L é a indutância.

De acordo com Halliday (2013), em um circuito RLC em paralelo, a fórmula da impedância é dada por:

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} \quad (1.2)$$

Onde: R é a resistência do material (fio da bobina).

A partir da equação (1.2), quando  $X_L$  é igual a  $X_C$ , tem-se um circuito puramente resistivo e, a tensão e a corrente no circuito LC estão em fase, conseqüentemente, o fator de potência é igual a 1 (um), não havendo perda de potência por defasagem de corrente. Segundo Jorge (2012), estima-se que ocorre uma perda de 25% de energia no sistema atual de transporte e distribuição de energia por efeito *Joule*. A empresa *Witricity* garante que é possível obter uma eficiência de até 95% na transmissão de energia elétrica sem fio. Isto é possível, pois a transferência por ressonância é altamente seletiva em termos de frequência (SADIKU, 2013).

Quanto ao risco causado a seres vivos, essa tecnologia não é nociva à saúde, visto que este modo de transferência de energia não é radioativo (Cenci, 2013). Existe, ainda, uma organização independente ICNIRP (*International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection*) responsável por regulamentar os valores dos campos magnéticos e frequências emitidos por aparelhos que utilizam esta tecnologia. De acordo com ICNIRP (2009), a faixa máxima permitida de campo magnético é de 2 a 3 T e a frequência de 0 a 300 GHz. De acordo com Halliday (2013), calcula-se o valor do campo magnético por meio da seguinte fórmula:

$$B = \frac{\mu_0.i.n}{L} \quad (1.3)$$

Onde: B é o campo magnético;

$\mu_0$  é uma constante;

i é a corrente;

n é o número de voltas da bobina.

A eficiência da transmissão de energia depende da distância entre o transmissor e o receptor e do tamanho de suas respectivas bobinas. É importante ressaltar que a transmissão não é afetada por paredes e obstáculos (Witricity, 2015). Desse modo, a

eficiência na transmissão de energia pode se dar de maneira a se conseguir níveis de eficiência de transferência muito maiores com a transmissão sem fio, do que com a própria transmissão convencional, com fio. Inclusive, é possível que os equipamentos que operarão com esta nova tecnologia reduzirão seu custo de fabricação, além, ainda, de possibilitarem maior comodidade com o seu uso.

A utilização de aparelhos sem fio seria um ponto positivo para o meio ambiente, visto que a demanda de cabos seria reduzida. Além da independência da tomada, isso eliminaria os riscos de choques elétricos e seria possível o acoplamento indutivo a fim de transmitir energia elétrica a mais de um dispositivo simultaneamente (Witricity, 2015). Seguindo este raciocínio, existem inúmeras possibilidades que seriam tangíveis: desde carregadores de celular até o funcionamento de equipamentos domésticos, sem a necessidade de estarem conectados à tomada.

## 2 | MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1 Indução eletromagnética

Foi projetado um circuito para a aplicação do conceito de indução eletromagnética conforme mostrado na Figura 2.1.1.

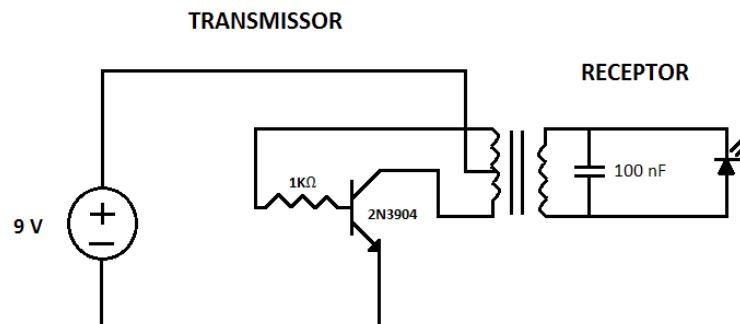


Figura 2.1.1 – Circuito indutivo

Fonte: Autores

Para isso, foram utilizados os seguintes componentes, listados na Tabela 2.1.1:

Material	Unidade	Especificação
Bateria	1 unidade	9 V
Bobina (primária)	1 unidade	Ø=0,51mm, 24 voltas
Bobina (secundária)	1 unidade	Ø=0,51mm, 24 voltas
Capacitor	1 unidade	100 nF
Led	1 unidade	Vermelho
Protoboard	1 unidade	840 furos
Resistor	1 unidade	1 KΩ
Transistor	1 unidade	2N3904

Tabela 2.1.1 - Lista de Materiais Protótipo Indução

Fonte: Autores

Neste protótipo, devido à necessidade de um circuito de chaveamento, foi polarizada a base do transistor. O período pode ser dividido em duas partes. No primeiro instante, a bobina primária está polarizada positivamente com uma tensão de 8,3 volts; em seguida, a base do transistor é alimentada, polarizando negativamente a bobina primária. Como os elétrons ora percorrem um sentido, ora em outro, a corrente é alternada.

A bobina do circuito receptor é excitada pelo campo magnético produzido pela bobina primária, acendendo um *led* no semiciclo positivo. A função do capacitor é filtrar as variações de tensão, possibilitando que a iluminação do *led* seja mais estável.

## 2.2 Ressonância magneticamente acoplada

Para a projeção deste circuito, foi imprescindível o uso de deduções matemáticas para definir o valor dos componentes a serem usados. Inicialmente, para determinar a capacitância, foram definidas a frequência da fonte de alimentação de 200 KHz e uma bobina com vinte e cinco espiras, com 4,5 cm de diâmetro.

Para a elaboração do solenoide, foi utilizado um fio de cobre esmaltado AWG-24, que de acordo com a tabela da *American Wire Gauge* (AWG), possui 0,051cm de diâmetro (POWERSTREAM, 2016).

De acordo com Braga (2014), A indutância da bobina pode ser definida a partir da seguinte equação:

$$L = 1,256 \cdot \frac{S \cdot n^2}{c} \cdot 10^{-8} \quad (2.2.1)$$

Onde: L é a indutância da bobina, em Henry;

S é a área abrangida por uma espira, em cm<sup>2</sup>;

c é o comprimento do enrolamento em cm;

E ainda:

$$S = \pi \cdot R^2 \quad \text{e} \quad c = d \cdot n$$

Onde: R é o raio da bobina, em cm;

d é o diâmetro do fio utilizado, em cm;

n é o número de espiras da bobina.

Realizando as devidas substituições na Eq. (2.2.1), obtêm-se:

$$L = 1,256 \cdot \frac{\pi \cdot R^2 \cdot n}{d} \cdot 10^{-8}$$

$$L = 1,256 \cdot \frac{\pi \cdot 2,25^2 \cdot 25}{0,051} \cdot 10^{-8} = 97,9206 \mu H \quad (2.2.2)$$

Substituindo este valor na Eq. (1.1), e isolando a capacitância, obtêm-se:

$$C = \frac{1}{4.\pi^2 . fo^2 . L} = \frac{1}{4.\pi^2 . 200000^2 . 97,9206 . 10^{-6}} = 6,4670 \text{ nF} \text{ (2.2.3)}$$

Foi projetado um circuito para a aplicação do conceito de ressonância acoplada conforme demonstrado na Figura 2.2.1.

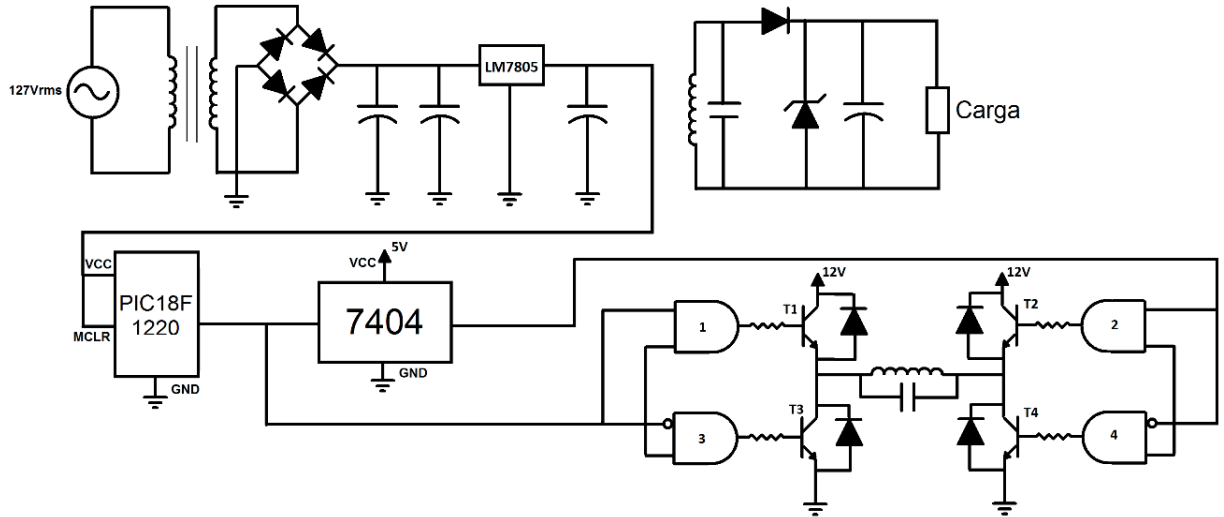


Figura 2.2.1 – Circuito ressonante

Fonte: Autores

Para isso, foram utilizados os seguintes componentes, listados na Tabela 2.2.1.

	Material	Quantidade	Especificação
	Bobina	1	Ø=0,51mm, 25 voltas
	Capacitor	2	Cerâmico, 3,3nF
	Capacitor	2	Cerâmico, 10nF
	Capacitor	1	Cerâmico, 100nF
	CI 7404	1	-
Circuito	LM 7805	1	-
Transmissor	Módulo L298N	1	-
	Protoboard	1	840 furos
	Bobina	1	Ø=0,51mm, 25 voltas
Circuito	Cabo de carregador	1	Padrão Nokia
Receptor	Capacitor	5	Cerâmico, 3,3nF
	Celular	1	Nokia 201 RM
	Diodo	1	1N4007
	Diodo Zener	1	1N4734
	Protoboard	1	840 furos

Tabela 2.2.1 – Lista de Materiais Protótipo Ressonância

Fonte: Autores

A Figura 2.2.2 mostra o esquema do circuito de configuração do microcontrolador PIC18F1220.

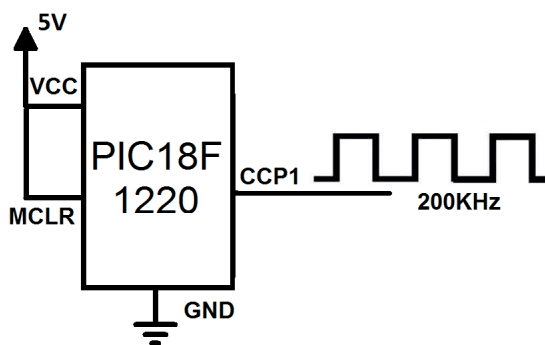


Figura 2.2.2– Circuito de configuração do microcontrolador PIC18F1220

Fonte: Autores

Primeiramente, foi configurado para o PIC18F1220 ter saída de onda quadrada com um *duty cycle* de 50%. Verificando o *datasheet* do fabricante do componente, nota-se as seguintes fórmulas para a sua configuração:

$$T_{pwm} = (PR2 + 1) \cdot 4 \cdot T_{osc} \cdot (\text{Prescaler do TMR2}) \quad (2.2.4)$$

$$DutyCycle = \frac{CCPRxL:CCPxCON < 5:4 >}{(PR2 + 1) \cdot 4} \quad (2.2.5)$$

Onde:  $T_{pwm}$  é o período do *PWM*;

$T_{osc}$  é o período do oscilador principal;

$CCPRxL$  é o registrador dos números mais significativos;

$CCPxCON$  é o registrador que armazena os dois números menos significativos.

Lembrando que a frequência  $F_o$  calculada é de 200 KHz, logo, o período do *PWM* é igual a  $5 \mu s$ . O oscilador principal do microcontrolador tem a frequência de 4 MHz, portanto, o período é de  $1 \mu s$ . Calculando os valores dos registradores de acordo com as Eq. (2.2.4) e (2.2.5):

$$PR2 = \frac{5 \cdot 10^{-6}}{\frac{4}{4 \cdot 10^{-6}} \cdot (1)} - 1 = 4 \quad (2.2.6)$$

$$CCPRxL:CCPxCON < 5:4 > = 0,5 \cdot (4 + 1) \cdot 4 = 10 \quad (2.2.7)$$

$$CCPRxL = 00000001$$

$$CCPxCON < 5:4 > = 10$$

Para selecionar o grupo de transístores a serem acionados, foi utilizado o circuito integrado 7404, uma porta lógica *not*. Seu circuito interno pode ser visto na Figura 2.2.3.



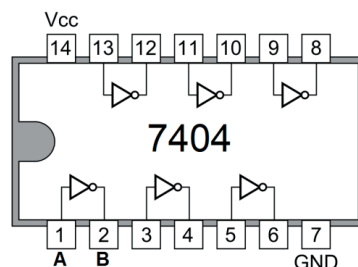


Figura 2.2.3 – Circuito interno do CI 7404

Fonte: Freescale Semiconductor, 2016

A fim de se obter uma corrente alternada nos terminais da bobina, com tensão de 16,4 V no semiciclo positivo e negativo, foi utilizado o módulo ponte H L298N. A Figura 2.2.4, representa o circuito do módulo.

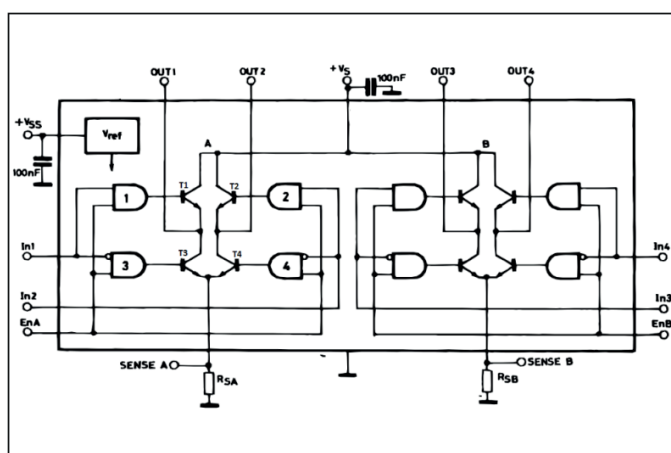


Figura 2.2.4 – Circuito do módulo L298N

Fonte: Stmicroelectronics, 2016

Se atentando apenas à ponte H da esquerda da figura 2.2.4, a saída do PIC18F1220 está conectada ao pino In1 do módulo L298N e, a saída do CI7404, ao pino In2. Deste modo, quando a saída do microcontrolador está em nível lógico 1 (um), a corrente aciona as portas lógicas 1 e 4, logo, a corrente flui entre os transístores T1 e T4. Em seguida, em nível lógico 0 (zero), as portas lógicas 2 e 3 são acionadas, logo, a corrente flui entre os transístores T2 e T3.

A Tabela 2.2.2 representa a tabela verdade do módulo L298N:

Entradas		Saídas					
In1	In2	T1	T2	T3	T4	Out 1	Out 2
0	0	0	0	0	0	0	0
0	1	0	1	1	0	0	1
1	0	1	0	0	1	1	0
1	1	0	0	0	0	0	0

Tabela 2.2.2 – Tabela Verdade L298N

Fonte: Autores

É importante ressaltar que, ao se desenergizar uma bobina, flui-se uma corrente no sentido oposto ao original, sendo capaz de queimar os componentes. Portanto, o módulo L298N, possui diodos em paralelo com os transístores, que funcionam como um sistema de proteção. Em subsequência, nas saídas Out 1 e Out 2, foram conectados os terminais da bobina em paralelo com dois capacitores de 3,3nF, finalizando o circuito transmissor.

Como representado na Figura 2.2.1, primeiramente no circuito receptor, tem-se a bobina em paralelo com cinco capacitores de 3,3 nF. Em seguida, com intuito de transformar a corrente alternada em corrente contínua, há um retificador de meia onda utilizando um diodo 1N4007. Para a estabilização da tensão após a retificação, foi colocado um capacitor de 100 nF. Devido à necessidade de alimentar a carga com aproximadamente 5 V, foi utilizado o diodo zener, que regula a tensão para 5,6 V, finalizando o circuito receptor.

Para aumentar a distância na transmissão de energia, é possível a construção de repetidores, apenas utilizando uma bobina de 25 espiras em paralelo com 5 capacitores de 3,3 nF.

### 3 | RESULTADOS E DISCUSSÕES

Finalizados os protótipos de transmissão de energia por indução e ressonância, foram analisadas as formas de ondas nas bobinas transmissoras e receptoras bem como, a distância máxima de detecção de campo magnético entre as bobinas.

A princípio, para simular a indução eletromagnética, com o auxílio de um osciloscópio digital, analisou-se as formas de onda do circuito transmissor e receptor do protótipo, a uma distância de aproximadamente 1 cm e sem nenhuma carga no circuito receptor. A tensão da fonte era de 16,5 V, a frequência do circuito de 100 KHz, bobinas 97,92  $\mu$ H e a capacitância de 100 nF.

As Figuras 3.1 e 3.2, representam a forma de onda da bobina transmissora e receptora, respectivamente.

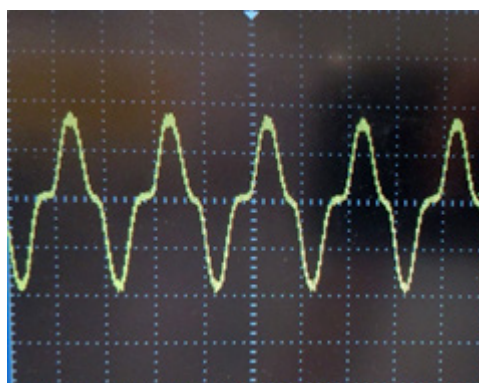


Figura 3.1 – Indução circuito transmissor

Fonte: Autores

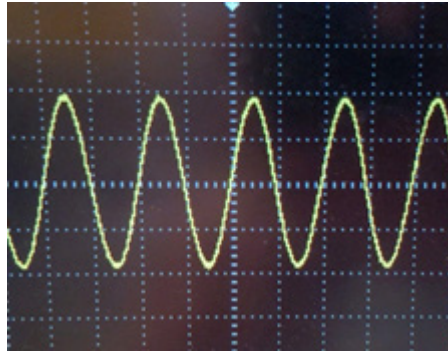


Figura 3.2 – Indução circuito receptor

Fonte: Autores

Posteriormente, para simular a ressonância foram feitas as análises das formas de ondas do circuito transmissor e receptor, a uma distância de aproximadamente 2 cm sem nenhuma carga no circuito receptor. A tensão da fonte era de 16,5 V, a frequência do circuito de 200 KHz, bobinas  $97,92 \mu\text{H}$  e a capacitância de 6,6 nF.

As Figuras 3.3 e 3.4, representam a forma de onda da bobina transmissora e receptora, respectivamente.

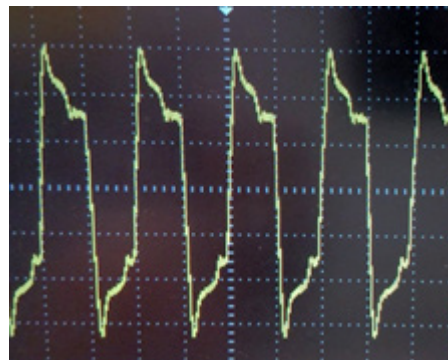


Figura 3.3 – Ressonância circuito transmissor

Fonte: Autores

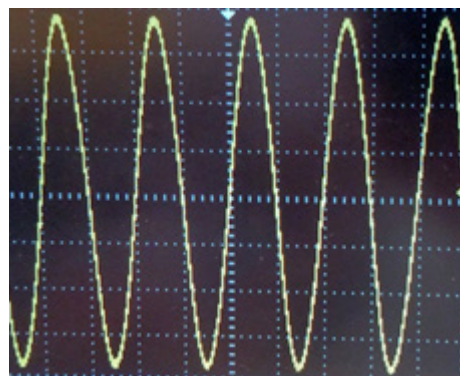


Figura 3.4 – Ressonância circuito receptor

Fonte: Autores

Subsequentemente, foram coletadas as tensões detectadas pelas bobinas receptoras, em função da distância das bobinas transmissoras, representadas pela

Tabela 3.1:

Distância	Tensão	
	Indução	Ressonância
1 cm	10,4 V	25,4 V
3 cm	2,6 V	15 V
6 cm	1,04 V	3,6 V
9 cm	480 mV	1,5 V
12 cm	192 mV	720 mV
15 cm	144 mV	256 mV
35 cm	16 mV	108 mV
50 cm	-	11,8 mV

Tabela 3.1 – Comparação de Tensão x Distância

Fonte: Autores

A Figura 3.5 representa os resultados obtidos na indução e na ressonância eletromagnética.

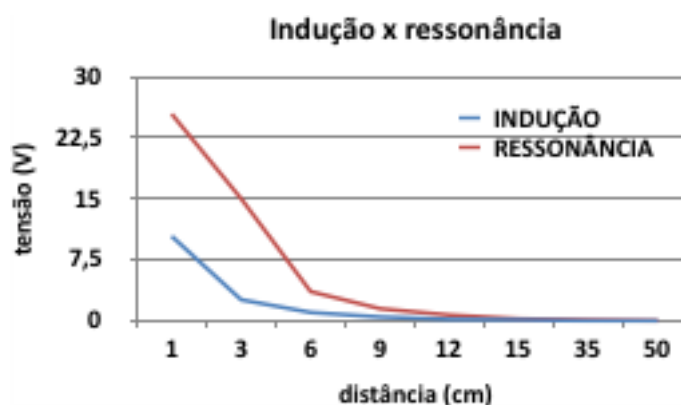


Figura 3.5 – Gráfico indução x Ressonância

Fonte: Autores

A Figura 3.6 representa a detecção de campo magnético a uma distância de aproximadamente 50 cm.

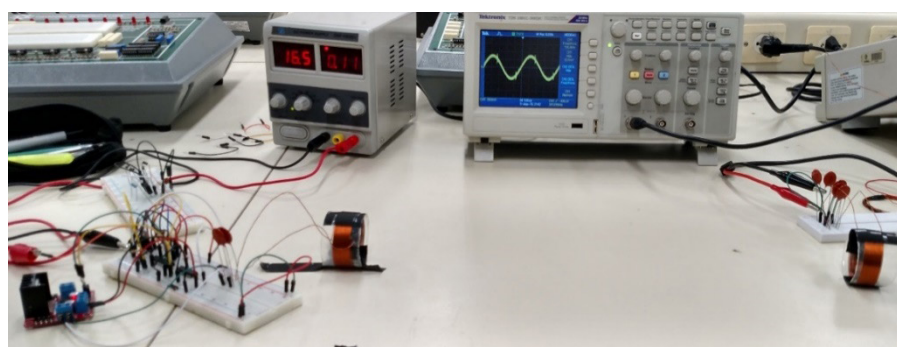


Figura 3.6 – Detecção do campo magnético

Fonte: Autores

Ao colocar um led no circuito receptor de ambos os protótipos, para acender

o led, na indução, a distância máxima foi de 4 cm entre as bobinas, enquanto na ressonância, 9 cm. Todavia, utilizando um repetidor na ressonância, essa distância aumentou para 12 cm. O último passo dos testes foi carregar um celular através da ressonância acoplada magneticamente, representado na Figura 3.7.

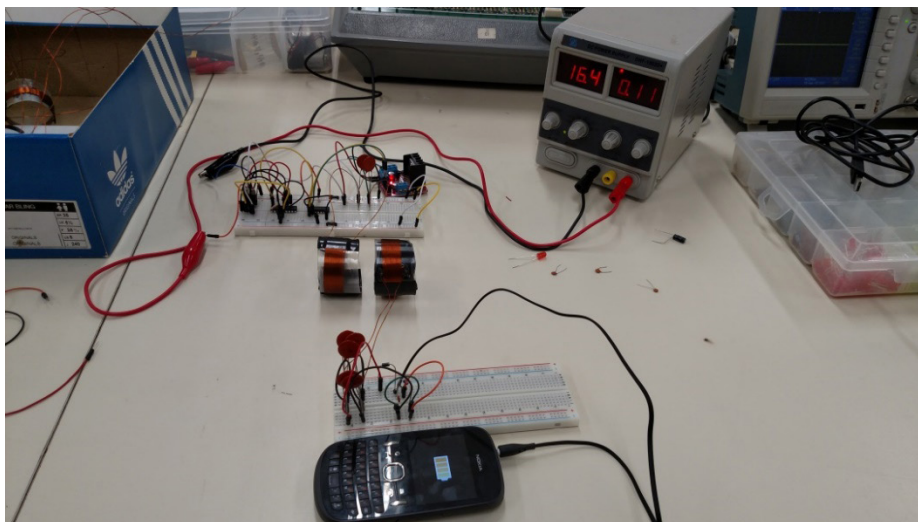


Figura 3.7 – Carregamento do celular

Fonte: Autores

Analisando as Figuras 3.1 e 3.2 (indução) e comparando-as com as Figuras 3.3 e 3.4 (ressonância), fica visível que a amplitude da onda da ressonância é muito maior em termos de tensão. Na Tabela 3.1, na indução eletromagnética, nota-se que há uma perda de tensão entre o gerador e a bobina transmissora. A uma distância de 1 cm, de 16,5 V da fonte de alimentação, apenas 10,4 V é apresentada na bobina. Isto ocorre pelo fato da presença da potência reativa, ou seja, a corrente não estava em fase com a tensão. O gerador não oscilava na mesma frequência natural de oscilação do circuito LC em paralelo, com isso, ocorre uma perda considerável de campo magnético que “volta” para a fonte, devido este não ser um circuito puramente resistivo. Na ressonância, acontece o processo inverso da indução. Como citado anteriormente, quando a frequência de oscilação da fonte coincide com a frequência natural de oscilação do circuito LC, a amplitude tende a aumentar. Com a montagem do protótipo isto pode ser comprovado na prática, visto que, a uma distância de 1 cm, a tensão da fonte era de 16,5 V e a tensão na bobina primária de 25,4 V.

Outro ponto positivo da ressonância é a questão da distância de detecção do campo magnético. Enquanto na indução foi medido 16 mV a uma distância de apenas 35 cm, na ressonância atingiu-se 11,8 mV a uma distância de 50 cm.

A Figura 3.7 apresenta o carregamento de um celular pelo protótipo de ressonância a uma distância de aproximadamente 4 cm entre as bobinas. Mesmo chegando 5,6 V no celular, nota-se que a corrente ainda é muito baixa (10 mA). Para aumentar a corrente, é necessário diminuir o número de espiras da bobina, visto que, o tempo de carregamento do indutor diminuiria. Um cuidado a ser tomado, é não permitir que

o indutor se carregue totalmente pois, com isso, ele se torna um curto circuito. Uma possível hipótese, seria o aumento da frequência. Para tal feito, é necessário realizar o cálculo da equação (2.2.3) para definir um novo valor de capacitância, que, em paralelo com o indutor, tenha a mesma frequência natural de oscilação que a do gerador.

Devido à limitação de 300 KHz do módulo ponte H L298N, não foi possível aumentar a frequência para obter melhores resultados, pois neste módulo, acima desta frequência, o sinal de saída é muito distorcido.

Calculando o valor do campo magnético através da equação (1.3):

$$B = \frac{(4.\pi . 10^{-7}) . (10.10^{-3}) . (25)}{4,5 . 10^{-2}}$$

$$B = 6,98\mu T \quad (4.1)$$

Logo, é constatado que o valor do campo magnético é muito inferior ao limite imposto pela ICNIRP, assim como a frequência, que é de 200 KHz.

#### 4 | CONSIDERAÇÕES FINAIS

A transmissão de energia sem fio, pode ser considerada uma tecnologia relativamente nova. A indução é facilmente encontrada no mercado, no entanto, ainda possui suas deficiências em termos de distância e desempenho.

Quanto ao risco à saúde, por meio da equação (4.1) é constatado que o valor do campo magnético é muito inferior ao limite imposto pela ICNIRP, assim como a frequência, que é de 200 KHz.

Com esta tecnologia é possível presumir uma residência onde se tenha um transmissor de energia sem fio e, repetidores distribuídos pela casa, permitindo uma maior comodidade e segurança no uso dos aparelhos eletrodomésticos.

Feitos os testes da máxima tensão de pico, máxima detecção de campo magnético e carregamento sem fio de uma carga, a partir dos dados obtidos conclui-se que, a ressonância é mais eficiente e melhor se encaixou no objetivo do projeto. Com isso, pode-se concluir que a ressonância é um novo passo para o melhoramento desta tecnologia.

#### REFERÊNCIAS

ALEXANDER, Charles; SADIKU, Matthew. **Fundamentos de Circuitos Elétricos**. 5. ed. Porto Alegre: Grupo A, 2013.

BLUNDELL, Stephen. **Magnetism: a very short introduction**. 1. ed. Oxford: Oxford University Press, 2012.

BRAGA, Circuitos Ressonantes LC. Disponível em: <<http://www.newtoncbraga.com.br/index.php/almanaque/1368-alm18.html>>. Acesso em: 08 de maio de 2015.

BRAGA, Calculando e Enrolando Pequenos Indutores. Disponível em: <<http://www.newtoncbraga.com.br/index.php/artigos/49-curiosidades/4151-art572.html>>. Acesso em: 19 de abril de 2016.

CENCI, Bárbara R. **Transmissão de Energia Elétrica Sem Fio**: uma proposta para integração entre conhecimentos de engenharia elétrica e de ensino médio. 2013. 10 f. Monografia (Especialização) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2013.

FREESCALE SEMICONDUCTOR. 74LS04 Datasheet (PDF) - Motorola, Inc. 2016. Disponível em: <<http://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/5638/MOTOROLA/74LS04.html>>. Acesso em: 16 mar. 2016.

HALLIDAY, David; RESNICK, Robert. **Fundamentos de Física**: eletromagnetismo. 9. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2013.

ICNIRP, Static Magnetic Fields. Disponível em: <<http://www.icnirp.org/en/frequencies/static-magnetic-fields-0-hz/index.html>> Acesso em: 06 de maio de 2015

JORGE, Luis Filipe Romba. **Sistema de Transmissão de Energia Elétrica**: sem utilização de cabos nem meios ferromagnéticos. 2012. 106 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Electrotécnica, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2012. Cap. 2.

MICROCHIP. PIC18F1220 Datasheet (PDF) - Microchip Technology. 2016. Disponível em: <<http://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/87779/MICROCHIP/PIC18F1220.html>>. Acesso em: 13 mar. 2016.

POWERSTREAM. Wire Gauge and Current Limits Including Skin Depth and Strength. 2016. Disponível em: <[http://www.powerstream.com/Wire\\_Size.htm](http://www.powerstream.com/Wire_Size.htm)>. Acesso em: 20 set. 2015.

STMICROELECTRONICS. L298N Datasheet (PDF) - STMicroelectronics. 2016. Disponível em: <<http://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/22440/STMICROELECTRONICS/L298N.html>>. Acesso em: 17 fev. 2016.

ST MICROELETRONICS. L7805 Datasheet (PDF) - STMicroelectronics. 2016. Disponível em: <<http://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/22615/STMICROELECTRONICS/L7805.html>>. Acesso em: 16 mar. 2016

TESLA, Nikola. **Minhas Invenções**: A autobiografia de Nikola Tesla. 1. ed. São Paulo: Unesp, 2012.

TESLA, Nikola Tesla's Electricity Inventions. Disponível em: <<http://www.teslasociety.org/>>. Acesso em: 03 de maio de 2015.

WITRICITY, Witricity Technology: The Basics. Disponível em: <<http://witricity.com/pages/technology.html>> Acesso em: 2 de maio de 2015.

## **SOBRE A ORGANIZADORA**

**Jaqueline Oliveira Rezende** Possui graduação em Engenharia Elétrica, com certificado de estudos em Engenharia de Sistemas de Energia Elétrica e mestrado em Engenharia Elétrica, ambos pela Universidade Federal de Uberlândia (UFU). Atualmente é aluna de doutorado em Engenharia Elétrica, no Núcleo de Dinâmica de Sistemas Elétricos, pela Universidade Federal de Uberlândia. Atuou como professora nos cursos de Engenharia Elétrica e Engenharia de Controle e Automação. Tem realizado pesquisas em Sistemas de Energia Elétrica, dedicando-se principalmente às seguintes áreas: Energia Solar Fotovoltaica; Curvas Características de Painéis Fotovoltaicos; Dinâmica de Sistemas Elétricos; Geração Distribuída; Simulação Computacional; Algoritmo Genético.



Agência Brasileira do ISBN  
ISBN 978-85-85107-46-8

