

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

**Projeto e Desenvolvimento de Dispositivo para
Transmissão de Energia Elétrica sem Fios por
Modos Ressonantes**

Reinaldo Lima de Abreu

Itajubá, Outubro de 2012

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Reinaldo Lima de Abreu

**Projeto e Desenvolvimento de
Dispositivo para Transmissão de
Energia Elétrica sem Fios por Modos
Ressonantes**

Dissertação submetida ao programa de pós-graduação em Engenharia Elétrica como parte dos requisitos para obtenção do título de mestre em Ciências em Engenharia Elétrica

Área de concentração: Automação e Sistemas
Elétricos Industriais

Orientador: Dr. Tales Cleber Pimenta

Coorientador: Dr. Danilo H. Spadoti

Outubro de 2012

Itajubá

Resumo

Este trabalho apresenta um estudo sobre a técnica de transmissão de energia sem fios por modos ressonantes. Valores analíticos foram calculados e simulações numéricas foram realizadas visando aperfeiçoar a eficiência do sistema. Foram modificados os parâmetros construtivos das antenas do sistema emissor/receptor, como: raio da bobina das antenas, número de enrolamentos das bobinas, distância de separação entre os enrolamentos das bobinas e distância de separação entre o sistema emissor/receptor numa faixa de até 2 metros.

Um modelo experimental foi elaborado utilizando antenas com uma espira no sistema emissor e receptor. Como carga foi utilizada uma lâmpada incandescente de 1,2 watts. A máxima eficiência experimental atingida, para uma frequência de ressonância de 7,17 MHz foi de 31,5 % a 2,5 cm e 7,5 % a 13 cm de separação.

Palavras-Chave: Transmissão de energia, sem fios, modos ressonantes, eficiência.

Abstract

This paper presents a study on the technique of wireless power transfer by resonant modes. Values were calculated analytical and numerical simulations were performed to optimize the system's efficiency. Have been modified construction parameters of antennas of the transmitter/receiver's system, such as : the radius of the antenna coil, number of windings of the coils, the separation distance between the windings of the coils and the separation distance between the system transmitter / receiver in a range up to 2 meters.

An experimental model was designed using a loop antenna in the transmitter and receiver system. As Load was used an incandescent lamp of 1.2 watts. The experimental maximum efficiency achieved for a resonant frequency of 7.17 MHz was 31.5% in 2.5 cm and 7.5 % to 13 cm of separation.

Keywords: Power transfer, wireless, resonant modes, efficiency.

Sumário

Sumário	5
Lista de Figuras	7
Lista de Tabelas	9
1. Introdução	10
1. 1. Proposta.....	13
1. 2. Riscos da Energia Irradiada	13
1. 3. Modelos de Transferência Ressonante de Energia.....	16
2. Desenvolvimento Teórico	18
2. 1. Descrição do Modelo das Antenas	20
2. 2. Campos Próximos e Campos Distantes	22
2. 3. Indutância Mútua	23
2. 4. Coeficiente de Acoplamento.....	26
2. 5. Eficiência	27
2. 6. Condições Específicas para Obter Alta Eficiência	27
3. Investigação Numérica	29
3.1. Análise da eficiência em relação a distância de separação d , com uma espira no emissor e receptor.....	31
3.2. Variação do raio da bobina receptora.....	36
3.3. Variação no número de enrolamentos das bobina emissora e receptora (N).....	37
3.4. Variação da distância entre os enrolamentos da bobina ($2c$).....	39
3.5. Análise da eficiência em relação a distância de separação d , com $N = 10$ espiras no emissor e receptor.....	40
4. Projeto e Implementação	42
4.1. Requisitos do Sistema	43
4.2. Projeto do Sistema Transmissor e Receptor.....	46
4.3. Implementação do Sistema	47
5. Análise do Protótipo Experimental.....	51

6. Conclusões e Trabalhos Futuros	55
Referências	57
ANEXO I – Código Matlab® para Cálculo da Indutância Mútua pelo método de Grover [34,35]	60
ANEXO II – Código Matlab® para Interpolação da Eficiência na Transmissão de Energia Sem Fios	74
ANEXO III – Design Amplificador de RF de 1W	75
ANEXO IV – Publicações	76

Lista de Figuras

Figura 1.1 - Modelo de transmissão de energia sem fios em uma residência [4].....	11
Figura 1.2 - Experimento dos pesquisadores do MIT acendendo uma lâmpada de 60W a 2 metros de distância, sem fios [5,6]......	12
Figura 1.3 – Gráfico adaptado de [11] representando a intensidade dos campos magnéticos, campos elétricos e densidade de potência.....	15
Figura 2.1 - Modelo de Esquema de Transmissão/Recepção de Energia Sem Fios [9,11]......	19
Figura 2.2 - Modelo de circuito equivalente para uma antena tipo quadro [32]......	20
Figura 2.3 - Modelo adotado para parâmetros das bobinas [32]......	21
Figura 2.4 - Caso geral para cálculo da indutância mútua [34]......	24
Figura 2.5 – Interface visual do software desenvolvido em Matlab.....	26
Figura 3.1 - Modelo 3D simulado, exibindo o campo magnético na componente paralela as espiras da bobina.	29
Figura 3.2 - Modelo 3D simulado, exibindo o campo magnético na componente paralela a espira da bobina.	32
Figura 3.3 – Medições para bobinas com três materiais distintos, cobre, ouro e prata.	33
Figura 3.4 - Eficiência simulada para distância, d , entre as bobinas variando em quatro valores: 10 cm, 25 cm, 50 cm e 200cm.	34
Figura 3.5 - Gráfico da eficiência para raios da bobina receptora de 15 cm, 30 cm e 45 cm.....	36
Figura 3.6 - Eficiência simulada variando o número de espiras: $N=1$, $N=3$, $N=5$, $N=7$ e $N=10$	38
Figura 3.7 - Eficiência simulada variando a distância de separação dos enrolamentos $2c$ de 1 cm a 5 cm.....	39

Figura 3.8 - Eficiência simulada variando a distância d para 10 cm, 30 cm, 50 cm e 200 cm, número de espiras por bobina (N) igual a 10.	40
Figura 4.1 – Antena do transmissor confeccionada, tipo espira com um enrolamento, diâmetro de 23 cm e bitola do fio de 6 mm.....	44
Figura 4.2 - Antena do receptor confeccionada, tipo espira com um enrolamento, diâmetro de 23 cm e bitola do fio de 6 mm.....	44
Figura 4.3 – Sistema para transmissão de energia sem fios projetado	47
Figura 4.4 - Sistema operando na frequência de 7,16 MHz, para a distância de separação de 4 cm.	50
Figura 5.1 – Figura da análise do sistema acoplado para distância de 2,5 cm. Em rosa está o parâmetro S_{11} em dB e em marrom está o parâmetro S_{21} em dB.....	51
Figura 5.2 – Gráfico da eficiência em função da distância, para os casos analítico, simulado e experimental.....	52

Lista de Tabelas

Tabela 3.1 - Parâmetros fixos adotados nos cálculos	32
Tabela 3.2 - Máximas eficiências encontradas para $N = 1$ em diferentes valores de d	35
Tabela 3.3 - Condições para alta eficiência para Frequência de 1,6 MHz e distância $d = 10$ cm.....	35
Tabela 3.4 - Máximas eficiências encontradas para $N = 10$ em diferentes valores de d	41
Tabela 4.1 – Lista de equipamentos disponíveis para uso.....	42
Tabela 4.2 – Características das dimensões das antenas.	45
Tabela 4.3 - Valores das indutâncias pelo método analítico, simulado e experimental.	45
Tabela 4.4 – Comparação dos valores dos capacitores, Adotado x Medido Experimentalmente.....	46
Tabela 4.5 - Tabela de valores da indutância mútua calculada analiticamente e numericamente, para distâncias de 2,5 cm a 20 cm.	48
Tabela 5.1 – Parâmetros S11 e S21 medidos para o sistema acoplado a distâncias de 2,5 a 20 cm.....	52
Tabela 5.2 - Condições para alta eficiência para frequência de 7,17 MHz e distância $d = 2,5$ cm.....	53
Tabela 5.3 – Comparação do resultado prático com outros trabalhos.....	54

1. INTRODUÇÃO

Os esforços dedicados ao desenvolvimento de sistemas para transmissão eficiente de energia sem fio vêm de longa data. Um dos pioneiros nesta busca foi Nikola Tesla [1] (final do século XIX e início do século XX), que tentou, sem sucesso, transmitir grande quantidade de energia sem a necessidade da rede elétrica. Seus resultados não foram satisfatórios devido às grandes perdas que o sistema apresentava e a necessidade de bobinas de elevadas dimensões [1].

Para longas distâncias (de metros a poucos quilômetros), atualmente, as antenas omnidirecionais são empregadas para transmissão de sinais irradiados (transmissão de informações). Quando o objetivo é transferir energia, este padrão não se torna atrativo, pois quase que a totalidade da energia é perdida para o espaço livre, visto que o sistema opera na região de campo distante [2],[3]. Assim sendo, o sistema para transmissão sem fios de grandes blocos de energia e a longas distâncias foi por muito tempo abandonado [2].

Algumas das motivações que levaram a retomada das investigações em transmissão de energia sem fios se deve aos avanços obtidos na área de microeletrônica e na tecnologia da informação. Estas duas áreas tem contribuído para um constante crescimento do número de dispositivos eletrônicos móveis, tais como: notebooks, celulares, smartphones e diversos outros dispositivos portáteis. Todos esses possuem alimentação típica por baterias, e, portanto, necessitam ser recarregados regularmente.

Considerando essa necessidade de recarregamento de energia pelos dispositivos, pode-se conjecturar a seguinte situação: uma fonte emissora transmitindo energia em uma pequena região ao seu redor, no qual, pode-se aproximar desta fonte os circuitos receptores (baterias) dos dispositivos móveis, e, assim, recarregá-los livremente dentro deste ambiente sem a necessidade de fios, conforme exibido na Figura 1.1:

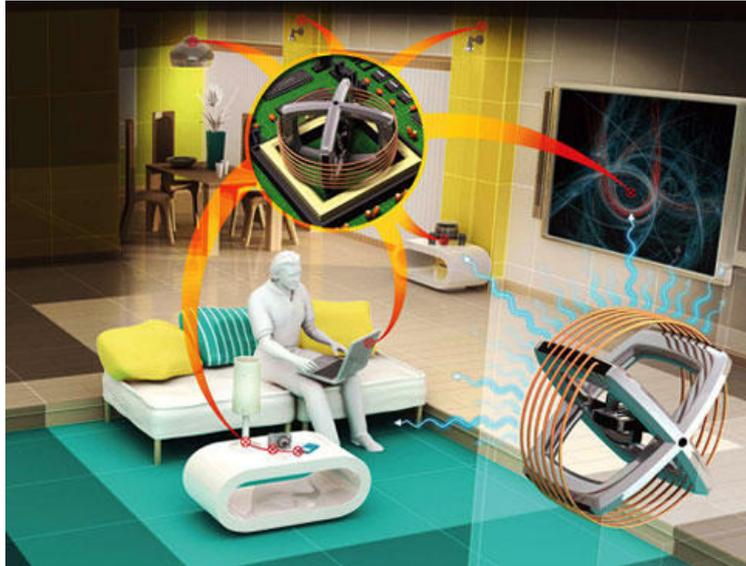


Figura 1.1 - Modelo de transmissão de energia sem fios em uma residência [4].

Neste contexto, em 2006, um grupo de pesquisadores do Massachusetts Institute of Technology - MIT (liderados pelo professor Dr. Marin Soljačić) investigaram a viabilidade de usar um dos modos eletromagnéticos ressonantes para a transferência não-irradiante de energia sem fios. Os pesquisadores, ao buscarem uma forma eficiente de transmissão, demonstraram o acendimento de uma lâmpada de 60W, dentro de um alcance de 2 metros e obtiveram uma eficiência de 40% [3]. Para isso, utilizaram duas bobinas de cobre (sem conexão física entre elas) com raio de 30 cm cada, sendo uma bobina emissora, colocada junto a uma fonte de potência calibrada com sinal senoidal com frequência em torno de 10 MHz e uma bobina receptora. A lâmpada acendeu com o uso do modo eletromagnético ressonante proposto, o resultado do experimento é exibido na Figura 1.2:



Figura 1.2 - Experimento dos pesquisadores do MIT acendendo uma lâmpada de 60W a 2 metros de distância, sem fios [5],[6].

Em 2009, Imura e coautores [7] em um projeto similar ao proposto pelo grupo do professor Dr. Marin Soljačić, desenvolveram um sistema pra transmissão de energia sem fios com objetivo de carregar carros elétricos. A eficiência obtida foi de 65% a uma distância de 28 cm. Esta eficiência decaía abaixo de 20% para uma distância da ordem de 40 cm. O sistema operava na faixa de cerca de 15,9 MHz e apresentava bobinas com 5 enrolamentos no emissor e no receptor, com raio de 15 cm cada.

Porém, em 2011, Sample e coautores [8], ao realizar experimentos com 4 bobinas, sendo o sistema transmissor contendo 2 bobinas e o receptor contendo 2 bobinas também, obtiveram eficiências de 76% e 50%, a distâncias de 55 cm e 1 metro, respectivamente. O sistema operava na faixa de 7,95 MHz e apresentava bobinas com 6 enrolamentos no emissor e no receptor, com raio de 29,5 cm cada.

Recentemente, em 2012, Thomas e coautores [9], conseguiram demonstrar experimentalmente, uma eficiência de 76,9% a uma distância de 20 cm. A eficiência decaía para 41,8% a 35 cm e um decaimento ainda maior, para 13%, a uma distância de separação de 50 cm.

Diante de tais resultados, a comunidade acadêmica e científica vem retornando a pesquisar sobre o sistema de transmissão de energia sem fios, analisando a eficiência obtida diante de modelos propostos, como o do grupo do Dr. Marin Soljačić [3], Imura [7], Sample [8], Thomas [9],[11] e Kim [10], o qual reúne diversos artigos e experimentos da área.

1. 1. Proposta

Portanto, este trabalho tem por objetivo investigar numérica e experimentalmente a eficiência do sistema de transferência de energia sem fios por modos ressonantes, ou seja, a quantidade de energia captada no sistema receptor em comparação a energia inserida no sistema transmissor. Para isso, serão investigados teoricamente a influência da variação dos parâmetros físicos de projeto, como: número de espiras do sistema emissor/receptor, espaçamento entre os enrolamentos de cada bobina, a distância de separação entre as mesmas, variação da distância entre o sistema emissor/receptor, raio da bobina receptora. Por fim, um modelo experimental será desenvolvido para comprovar a viabilidade da eficiência na transferência de energia sem fios por modos ressonantes.

1. 2. Riscos da Energia Irradiada

A irradiação ocorre quando a energia fornecida a antena é quase que, em sua totalidade, consumida pela mesma que irradia as ondas eletromagnéticas para o meio. O parâmetro que avalia a intensidade do quão irradiante é uma antena é a resistência de radiação. Quanto maior este parâmetro, mais potência será consumida pela resistência, logo uma maior quantidade de sinal será irradiado [3,5].

A transmissão de energia sem fios por irradiação foi demonstrada pela primeira vez em 1964, onde um helicóptero foi energizado sem o intermédio de fios, por um feixe direcional de micro-ondas para um grande banco de antenas [12].

Com o passar dos anos foram feitas muitas demonstrações de transferência de energia por feixe de micro-ondas. Em [13],[14], foi transferida energia através de um feixe direcional para um banco de antenas de 3,2 x 3,6 metros. Em [15],[16], foram alimentados veículos de reconhecimento aéreo, e em [17] energizou-se veículos de reconhecimento terrestre. Publicações teóricas foram desenvolvidas em [18],[19] para transmissão de energia do espaço para a Terra, e em [20], propõe-se alimentar uma base de fabricação de satélites remotamente.

O presente trabalho, desenvolve um sistema para transmissão sem fios de energia não-irradiante. Embora o sistema seja não-irradiante e, para tal, seja usado uma

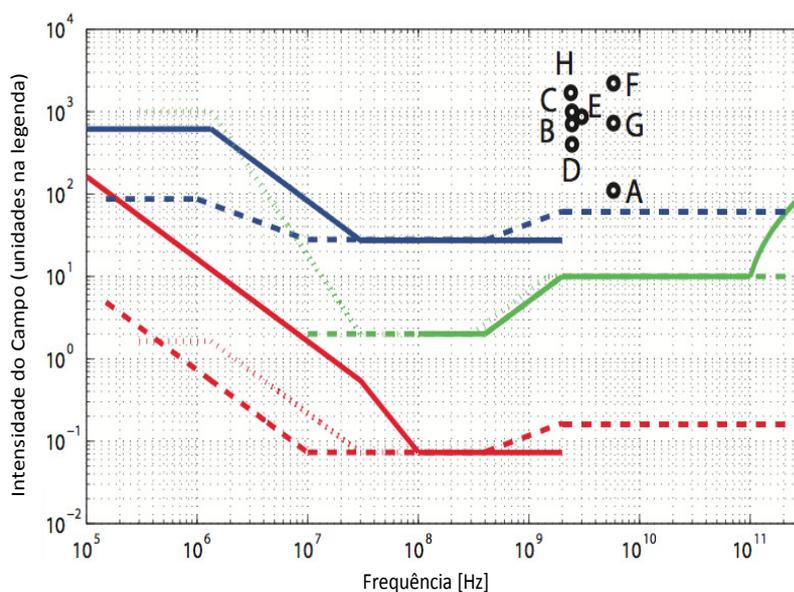
antena tipo espira, que possui um nível de irradiação muito baixo, essa pequena irradiação da antena foi avaliada.

De acordo com estudos da Organização Mundial de Saúde (OMS), não há evidências de que a exposição humana a campos eletromagnéticos cause efeitos adversos à saúde, desde que respeitados determinados limites [11].

Internacionalmente foram encontrados 3 instituições que avaliam o perigo de exposição a radiação eletromagnética: O “International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection” (ICNIRP) [21][22], o “Institute of Electrical and Electronics Engineers” (IEEE) [23] e o “Federal Communications Commission” [24].

No Brasil, a Agência Nacional de Telecomunicações (ANATEL) regula esses limites através da Lei 11.934/2009 e pela Resolução 303/2002, com base nas diretrizes da ICNIRP, recomendadas pela OMS.

Nos estudos citados [13-20], foram explorados os efeitos sobre a pele a exposição de ondas eletromagnéticas de até 300 GHz. Cada conjunto de normas tenta quantificar os limites seguros de exposição para ambientes regulados (profissionais cujas profissões exigem a exposição regular a campos eletromagnéticos) e ambientes não controlados (exposição pública comum a radiação). Esses limites são plotados na Figura 1.3 para as forças de irradiação de campo elétrico [V/m] e campo magnético [A/m] (em baixas frequências) e a densidade de potência irradiada [W/m^2] (em altas frequências). Analisando os limites fica claro que muitos meios de transmissão de quantidades significativas de energia apresentam riscos de exposição.



	IEEE – Campo Magnético, [A/m]
	IEEE – Campo Elétrico, [V/m]
	IEEE – Densidade de Potência, [W/m ²]
	ICNIRP – Campo Magnético
	ICNIRP - Campo Elétrico, [V/m]
	ICNIRP - Densidade de Potência, [W/m ²]
	FCC - Campo Magnético, [A/m]
	FCC - Campo Elétrico, [V/m]
	FCC - Densidade de Potência, [W/m ²]

Figura 1.3 – Gráfico adaptado de [11] representando a intensidade dos campos magnéticos, campos elétricos e densidade de potência.

As letras na Figura 1.3 referem a estudos teóricos (A,E) e análises experimentais (B-D, F, H). As referências para cada letra são: A [20], B [13][14], C [15], D [16], E [18], F [17] e H [19].

Os primeiros sistemas sugeridos [18],[19] apresentam possíveis riscos de exposição devido ao seus altos valores de densidade de potência. As mais novas tentativas de irradiar energia incluem esforços internacionais para produzir satélites

capazes de transmitir potência através da atmosfera da Terra para bases estacionárias na superfície da Terra [25-27]. No entanto, estudos mais recentes teorizam limites quase-seguros de exposição em estações de recepção em terra [28-30]. Apesar disso, o Satélite de Energia Solar para produzir o equivalente de uma usina de energia nuclear (cerca de 1 GW/s), deveria irradiar a energia de plataformas de tamanhos quilométricos e teria um custo de implementação de bilhões de dólares.

1.3. Modelos de Transferência Ressonante de Energia

O modelo de transferência de energia sem fios não-irradiante foi apresentado em [3,4] e analisado por Thomas e coautores [9],[11]. O acoplamento entre as bobinas emissora e receptora é descrito pela teoria de modos acoplados [31]. O trabalho demonstra uma investigação numérica e teórica da transferência de energia entre dois objetos ressonantes. Ao contrário dos trabalhos dos pesquisadores do grupo do professor Dr. Marin Soljačić [3,4] que apresenta uma abordagem do ponto de vista da física do sistema através da Teoria de Modos Acoplados, no presente trabalho o tema é abordado a partir da teoria de circuitos por parâmetros distribuídos, onde modelos equivalentes são implementados para se obter uma análise mais esclarecedora.

A antena tipicamente utilizada nos modelos de transferência de energia sem fios por modos ressonantes é a antena tipo quadro ou espira. Isso é devido a mesma apresentar uma baixa resistência de radiação. A energia que é irradiada é perdida, logo busca-se uma baixa resistência de radiação, para que a perda seja o menor possível. A equação que representa a resistência de radiação da antena tipo quadro é dada pela equação (1.1) [32]:

$$R_r = 20\pi^2 \left(\frac{C}{\lambda}\right)^4 N^2 \approx 31,171 N^2 \left(\frac{S^2}{\lambda^4}\right) \quad (1.1)$$

Onde:

R_r = Resistência de radiação [Ω];

C = Comprimento da circunferência da espira [m];

λ = Comprimento de onda do sinal da antena [m];

N = número de espiras da antena;

S = Área da circunferência da espira [m^2];

A estrutura ideal minimiza a energia irradiada enquanto maximiza o dipolo magnético da antena. Um baixo valor de resistência de radiação é o principal motivo para adotar a antena tipo quadro. Vale ressaltar que deve-se levar em consideração no projeto da antena, os parâmetros indiretos como: frequência do sinal, bitola do fio para confecção da antena, número de espiras e raio da antena.

2. DESENVOLVIMENTO TEÓRICO

Como descrito, o objetivo do trabalho aqui proposto é a transferência de energia sem fios com a máxima eficiência possível. O fato da transmissão de energia objetivada ser sem fios leva a buscar uma analogia direta ao sistema de comunicação de dados sem fios.

Atualmente, a transferência de informações é dada através de sinais irradiados, ou seja, um sinal (por exemplo: uma senóide) é carregado com informações e transmitido para todas as direções. Esta transferência é dada geralmente através de uma antena omnidirecional (em distâncias de metros a poucos quilômetros). Na transferência de informações, em sua maioria, o objetivo é espalhar ao máximo o sinal para que qualquer receptor possa captar os dados dentro de uma área desejada. Por se tratar de informações, não há necessidade de se captar o sinal com potência elevada, visto que só se deseja extrair os dados contidos no mesmo.

Quando o objetivo é transferir energia, esse padrão não se torna atrativo, pois quase que a totalidade da energia é perdida para o espaço livre. O sistema opera na região de campo distante e a potência do transmissor é consumida, quase que em sua totalidade, pela antena para irradiar o sinal.

A maneira de se obter esta transferência de energia eficiente se deu através da busca de um sistema que possibilitasse captar energia de forma que a mesma não fosse irradiada, a fim de diminuir as perdas, e que possibilitasse o consumo de energia apenas quando a carga exigisse. A solução foi desenvolver um sistema que operasse na região de campo próximo (detalhado na seção 2.2), onde há uma perda reduzida de energia para o espaço livre. 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 fim de se reduzir o consumo de energia da antena, utiliza-se sistemas elétricos ressonantes, de forma que as perdas de energia na frequência de ressonância sejam reduzidas ao máximo. O sistema ressonante série foi adotado por proporcionar uma máxima corrente na antena, o que induz um campo magnético mais intenso na mesma, aumentando o fluxo magnético captado no sistema receptor. A antena adotada foi uma antena tipo espira, pois apresenta uma baixa resistência de radiação, ou seja, não apresenta uma irradiação eficiente [32].

Logo, para desenvolver os estudos da técnica de transmissão e recepção de energia sem fios o modelo adotado está exemplificado na Figura 2.1 [9],[11]:

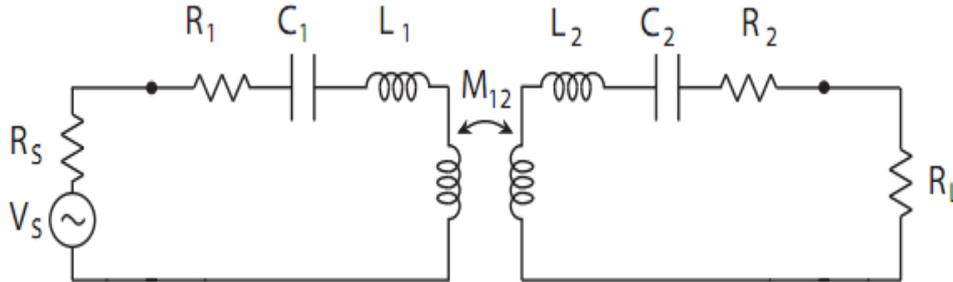


Figura 2.1 - Modelo de Esquema de Transmissão/Recepção de Energia Sem Fios [9],[11].

Os parâmetros são descritos como:

V_s = Fonte de alimentação do circuito emissor [V_{ac}];

R_s = Resistência interna da fonte de alimentação [Ω];

$R_{1,2}$ = Resistência de perdas do circuito [Ω];

$C_{1,2}$ = Capacitor de ressonância do circuito [F];

$L_{1,2}$ = Bobina emissora/receptora (indutância) [H];

M_{12} = Indutância mútua [H];

R_L = Resistência de carga [Ω].

Através do modelo exemplificado na Figura 2.1, serão descritos:

- *Descrição do Modelo das Antenas*: exibe os valores das indutâncias das antenas e as respectivas perdas na mesma;
- *Campos Próximos e Campos Distantes*: desenvolve uma breve explicação das características e principais diferenças entre Campos Próximos e Campos Distantes;

- *Indutância Mútua*: descreve o que é a indutância mútua e como ela pode ser calculada para diferentes situações;
- *Coefficiente de Acoplamento*: exhibe como o coeficiente de acoplamento está relacionado com a indutância mútua e como o mesmo influencia o acoplamento do sistema;
- *Eficiência*: demonstra como calcular analiticamente a eficiência do sistema de transferência de energia proposto;
- *Condições Específicas para Obter Alta Eficiência*: descreve as condições para obter alta eficiência para o sistema proposto, trata-se de algumas condições simplificadas da equação do cálculo de eficiência.

2.1. Descrição do Modelo das Antenas

Para o equacionamento matemático do sistema transmissor/receptor foram utilizados os modelos equivalentes descritos nas Figuras 2.2 e 2.3, e equacionados em (2.1), (2.2), (2.3) e (2.4), conforme, discutido em [32]:

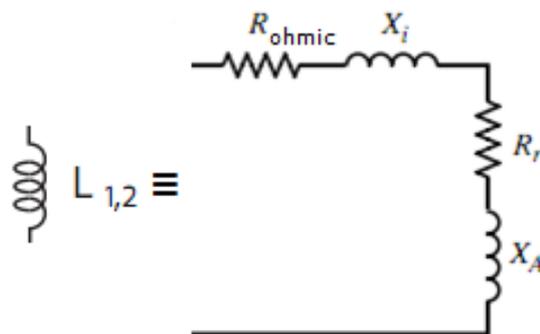


Figura 2.2 - Modelo de circuito equivalente para uma antena tipo quadro [32].

sendo:

$L_{1,2}$ = Antena tipo quadro ou bobina emissora/ receptora [H];

R_{ohmic} = Resistência de perdas da espira [Ω];

R_r = Resistência de irradiação [Ω];

X_i = Reatância interna de alta-frequência da antena = ωL_i [Ω];

$X_A = \text{Reatância externa indutiva da antena} = \omega L_A [\Omega];$

O modelo simplificado adotado para descrever os parâmetros internos de construção das bobinas está apresentada na Figura 2.3.

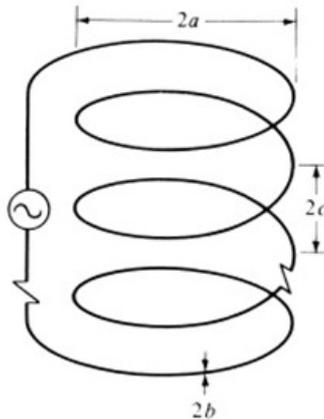


Figura 2.3 - Modelo adotado para parâmetros das bobinas [32].

sendo: a o raio da bobina, b o raio da bitola da bobina, e $2c$ a distância entre 2 enrolamentos da bobina. O número de espiras é definido pelo termo N .

A resistência de perdas da espira pode ser obtida por:

$$R_{ohmic} = \frac{Na}{b} R_s \left(\frac{R_p}{R_0} + 1 \right) \quad (2.1)$$

Onde,

$$R_s = \sqrt{\frac{\omega \mu_0}{2\sigma}} = \text{Impedância de superfície do condutor} [\Omega];$$

$R_p = \text{Resistência ôhmica por unidade de comprimento devido ao efeito de proximidade}$
($N \geq 2$) [Ω/m];

$R_0 = \frac{NR_s}{2\pi b}$ = Resistência ôhmica do efeito *skin* por unidade de comprimento [Ω/m];

μ_0 = Permeabilidade magnética do vácuo = $4\pi * 10^{-7}$ [H/m];

σ = condutividade do cobre = $5,998 * 10^7$ [S/m].

A expressão para o cálculo da resistência de irradiação advinda de (1.1), é dada por:

$$R_r = 20\pi^2 \left(\frac{2\pi a}{\lambda} \right)^4 \quad (2.2)$$

Onde, λ é o comprimento de onda do sinal.

Por fim, os termos L_A e L_i que representam a indutância da antena advinda do raio e bitola dos fios e a indutância interna da antena advinda do tipo de condutor utilizado e variável em função da frequência, e podem ser determinados por:

$$L_A = \mu_0 a \left[\ln \left(\frac{8a}{b} \right) - 2 \right] \quad (2.3)$$

$$L_i = \frac{a}{\omega b} \sqrt{\frac{\omega \mu_0}{2\sigma}} \quad (2.4)$$

2.2. Campos Próximos e Campos Distantes

Os termos campos próximos, campos distantes e zona de transição são geralmente utilizados ao se tratar de medições de antenas e regiões próximas, onde o alcance do emissor é igual a poucas vezes a maior dimensão do dispositivo receptor [33].

A região que se estende a mais de dois comprimentos de onda de distância da fonte é chamada região de campo distante.

Já a região entre o campo próximo e o campo distante é denominada zona de transição, pois possui uma combinação de características encontradas tanto no campo próximo quanto no campo distante.

Finalmente, a região localizada a menos de um comprimento de onda de distância da fonte é denominada região de campo próximo. Nesta região a relação entre o campo elétrico, \vec{E} , e o campo magnético, \vec{H} , não é trivial. Ao contrário do campo distante, onde as ondas eletromagnéticas são normalmente caracterizadas por um único tipo de polarização (horizontal, vertical, circular ou elíptica), todos os quatro tipos de polarização podem estar presentes na região de campo próximo.

O campo próximo está dividido, especificamente, em 2 regiões: a região de campo próximo reativo e a região de campo próximo irradiado. O limite exterior da região do campo próximo reativo é comumente considerado a uma distância de $\frac{1}{2\pi}$ vezes o comprimento de onda, ou seja, $(\frac{\lambda}{2\pi})$ à partir da superfície da antena. A irradiação de campo próximo abrange o restante da região, ou seja, de $\frac{\lambda}{2\pi}$ a λ . Tem-se, por exemplo, que na frequência de 10 MHz, uma região de campo próximo reativo deve ser menor que 4,77m. Esta região de campo próximo reativo será a região de interesse de trabalho, pois é a região onde o campo permanece reativo, ou seja, sem perdas por irradiação [33].

2.3. Indutância Mútua

A indutância mútua é a indutância que surge entre dois sistemas quando os mesmos apresentam uma certa proximidade. Ela está ligada diretamente ao fator de acoplamento, que descreve a intensidade pela qual os dois sistemas estão acoplados.

A indutância mútua é representada analiticamente pelo método geral proposto por Grover [34]. A Figura 2.4 representa o caso geral de bobinas de uma única espira circular e exhibe as variáveis mais relevantes para os cálculos:

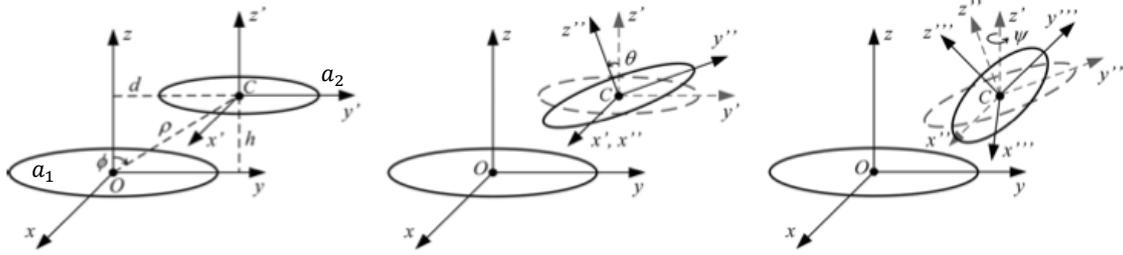


Figura 2.4 - Caso geral para cálculo da indutância mútua [34].

sendo:

h = distância de separação entre as antenas na direção z [m];

a_1 = raio da antena 1 [m];

a_2 = raio da antena 2 [m];

d = distância de separação na direção y [m];

θ = inclinação da antena 2 com relação a antena 1 sobre eixo z [°];

ϕ = inclinação da antena 1 com relação a antena 2 em relação ao centro C da antena 2;

ρ = distância de separação entre os centros da antena 1 até a antena 2;

ψ = rotação da antena 2 com relação ao eixo z .

A equação que define a indutância mútua para o caso geral é dada por [34]:

sendo:

$$p_1 = \pm \frac{\gamma c'}{l}, \quad p_2 = \mp \frac{\beta l^2 + \gamma a' b'}{lL}, \quad p_3 = \frac{ac'}{L},$$

$$p_4 = \mp \frac{\beta a' b' + \gamma l^2 + \delta b' c'}{lL}, \quad p_5 = \mp \frac{\beta c' + \delta a'}{l},$$

com:

$$\alpha = \frac{a_2}{a_1}, \quad \beta = \frac{x_c}{a_1}, \quad \gamma = \frac{d}{a_1}, \quad \delta = \frac{h}{a_1},$$

$$M_{12} = \frac{\mu_0 a_2}{\pi} \int_0^{2\pi} \frac{[p_1 \cos\varphi + p_2 \sin\varphi + p_3] \psi(k)}{k \sqrt{V_0^3}} d\varphi \quad (2.5)$$

e

$$l = \sqrt{a'^2 + c'^2}, \quad L = \sqrt{a'^2 + b'^2 + c'^2},$$

$$V_0^2 = \alpha^2 \left[\left(1 - \frac{b'^2 c'^2}{l^2 L^2} \right) \cos^2 \varphi + \frac{c'^2}{l^2} \sin^2 \varphi + \frac{a' b' c'}{l^2 L} \sin 2\varphi \right] + \beta^2 + \gamma^2 \\ \mp 2\alpha \frac{\beta a' b' + \gamma l^2}{lL} \cos \varphi \mp \frac{2\alpha \beta c'}{l} \sin \varphi,$$

Sendo:

- a', b', c' os parâmetros que definem a normal ao plano λ , contendo a segunda bobina;

- x_c a coordenada x do centro da bobina 2.

Ainda, na equação 2.5, define-se [9]:

$$k = \frac{4V_0}{A_0 + 2V_0}, \quad e \quad \psi(k) = \left(1 - \frac{k^2}{2} \right) K(k) - E(k),$$

com:

$$A_0 = 1 + a'^2 + \beta'^2 + \gamma^2 + \delta^2 + 2\alpha(p_4 \cos\varphi + p_5 \sin\varphi),$$

onde, os $K(k)$ e $E(k)$ representam as integrais elípticas completas de primeira e segunda ordem, e são definidas conforme [9]:

$$K(k) = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{d\beta}{\sqrt{1 - \kappa^2 \sin^2 \beta}}$$

$$E(k) = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sqrt{1 - \kappa^2 \sin^2 \beta} d\beta$$

Baseando-se num programa disponibilizado por Babic [35], foi desenvolvido um software com interface visual na plataforma Matlab[®] (Figura 2.5) para o cálculo dessa indutância mútua (ANEXO I). O software realiza o cálculo pelo método de Grover [34],[35].

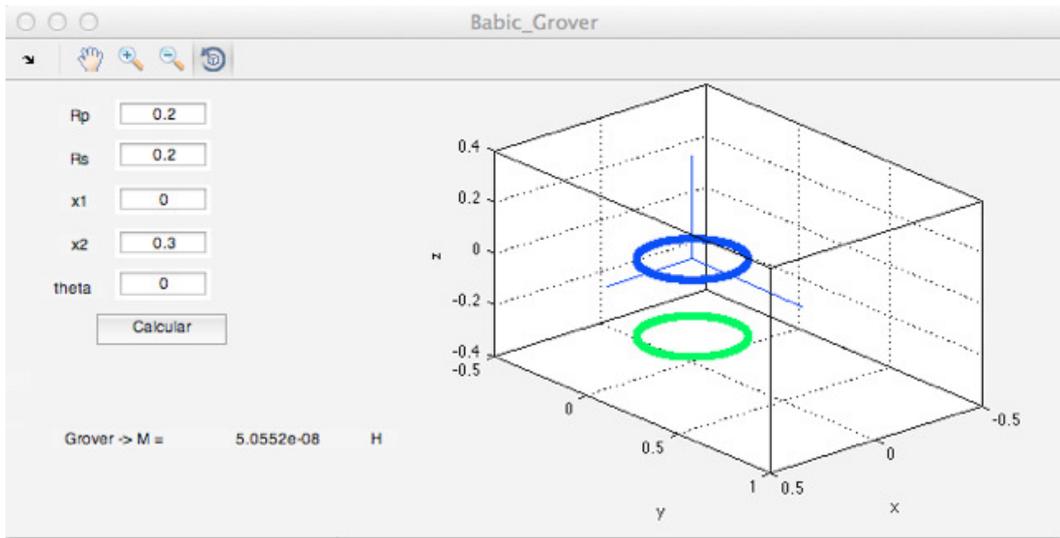


Figura 2.5 – Interface visual do software desenvolvido em Matlab.

2.4. Coeficiente de Acoplamento

Por definição, a indutância mútua descreve a intensidade pela qual os dois sistemas estão acoplados. Este termo é relacionado com o coeficiente de acoplamento κ :

$$\kappa = \frac{M_{12}}{\sqrt{L_1 L_2}} \quad (2.6)$$

Quando a indutância mútua na frequência de operação for maior que as perdas dos elementos de circuito, ou seja, $\omega M_{12} \gg R_1 R_2$, os elementos indutivos são fortemente acoplados e a eficiência da transferência de energia é alta [9,11]. Portanto, esta é uma das relações a ser investigada no desenvolvimento de projetos de transmissão sem fio.

2.5. Eficiência

A eficiência do sistema acoplado exibido na Figura 2.1 é representada pela equação (2.7) [9,11]:

$$\eta = \frac{(\omega M_{12})^2 R_L}{R_1(R_2 + R_L)^2 + (\omega M_{12})^2(R_2 + R_L)} \quad (2.7)$$

2.6. Condições Específicas para Obter Alta Eficiência

As condições para conseguir uma alta eficiência na transmissão de energia foram definidas por Thomas [9,11] como sendo três:

- Operar no regime de forte acoplamento,

$$(\omega M_{12})^2 \gg R_1 R_2 \quad (2.8)$$

- A carga equivalente deve ser muito maior que as resistências internas,

$$R_L \gg R_1, R_2 \quad (2.9)$$

- A carga equivalente deve ter um valor próximo ao termo da indutância mútua,

$$R_L \approx \omega M_{12} \quad (2.10)$$

Portanto, garantindo essas três condições, simultaneamente, é possível obter uma eficiência próxima de 100%.

Em vista dessas condições, foi elaborado um software em Matlab[®] (ANEXO II), onde é possível através de intervalos de valores, verificar a máxima eficiência que se pode adquirir sobre o sistema de transmissão de energia sem fios. Como exemplo, foram adotados no código uma frequência de 60 a 30 MHz, resistência de carga de 100 Ω a 1M Ω , resistência de perdas de 0.1 Ω a 100 Ω e indutância mútua de 1 nH a 1 uH. O que

resultou numa eficiência máxima de 41% para transmissão de energia, com os valores ideais dentro do alcance adicionado sendo: $\omega = 30$ MHz, $R_L=100 \Omega$, $R_{1,2} = 10 \Omega$, $M_{12} = 1$ uH.

Através deste código composto de um algoritmo de busca por força bruta é possível trabalhar os valores disponíveis para se calcular a máxima eficiência que pode ser atingida, bastando apenas fornecer uma faixa de valores para o software calcular. Vale ressaltar que deve se atentar quando aos valores viáveis para se acionar no código, para que o mesmo não calcule algo inviável de se implementar na prática.

Diante dos itens descritos no Capítulo 2, é possível calcular analiticamente a eficiência de um sistema para transferência de energia sem fios por modos ressonantes, para antenas com um enrolamento ($N=1$) e com tais ferramentas, projetar um sistema com as características desejadas dentro das limitações existentes.

3. INVESTIGAÇÃO NUMÉRICA

Para as simulações numéricas, e, portanto, a modelagem teórica, foi utilizado o software comercial COMSOL Multiphysics, que trabalha com a técnica dos elementos finitos na discretização dos problemas. Foram utilizados o módulo ACDC do software e a geometria 2D com simetria no eixo z. A geometria 2D com simetria no eixo z, apresenta características vantajosas para experimentos como o desenvolvido neste trabalho, pois através de um modelo 2D o software consegue por meio de rotação no eixo z, gerar um modelo 3D com as físicas transpostas para o modelo 3D, simplificando os cálculos e consequentemente reduzindo o tempo de processamento. O modelo 3D da simulação das bobinas é mostrado na Figura 3.1:

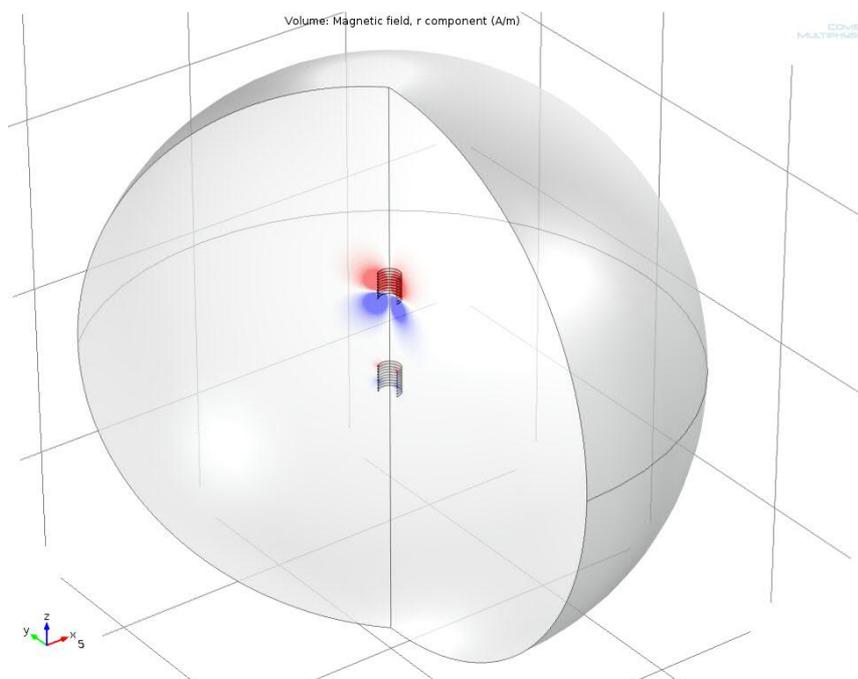


Figura 3.1 - Modelo 3D simulado, exibindo o campo magnético na componente paralela as espiras da bobina. Em vermelho está representado o campo magnético positivo e em azul o negativo. A esfera cinza representa a região de ar envolta da bobina.

O software Comsol Multiphysics é versátil, permitindo a integração com diferentes sistemas físicos. Nas simulações realizadas, dentro do módulo ACDC, foram integrados a física de Campos Magnéticos (*Magnetic Fields*) e a física de Circuitos

Elétricos (*Electric Circuit*), permitindo, assim, uma variação de parâmetros com maior facilidade.

A física de campos magnéticos permite simular todas as características relativas à campos magnéticos e através dela obter parâmetros como campo magnético, fluxo magnético e outros; permitindo ainda derivar parâmetros como indutância mútua, acoplamento e outros.

Já na física de circuitos elétricos é possível simular todas as características relativas à circuitos, dispondo de componentes elétricos como resistor, capacitor, indutor, fonte de tensão, corrente, e outros; permitindo ainda interligar outras físicas com a física de circuitos elétricos e com isso derivar parâmetros como a eficiência de todo circuito.

Na física de campos magnéticos foram investigadas as antenas utilizadas na transmissão e recepção. Esta antena é desenvolvida em um modelo 3D, ou seja, modela-se a mesma com os parâmetros físicos para posterior construção real. Na física de circuitos elétricos foram simulados os demais componentes do modelo da Figura 2.1. Com isso, é possível estudar a influência das variações desses componentes do desempenho do sistema. Posteriormente as duas físicas são integradas, permitindo, assim, simular o modelo da Figura 2.1 por completo.

Nos próximos subitens serão investigados, separadamente, a influência de cada parâmetro físico e de projeto no desempenho e eficiência da transmissão:

- *Análise da eficiência em relação a distância de separação d , com uma espira no emissor e receptor:* descreve a eficiência obtida em função da frequência, variando a distância de separação d para 10 cm, 30 cm, 50 cm e 2 metros, no caso de $N=1$.
- *Variação do raio da bobina receptora:* desenvolve a eficiência obtida em função da frequência para $N=1$, distância de separação $d=10$ cm e raio da bobina emissora 30 cm, porém variando-se o raio da bobina receptora para 15 cm, 30 cm e 45 cm.
- *Variação no número de enrolamentos das bobinas emissora e receptora (N):* exhibe os valores de eficiência em função da frequência, variando-se

conjuntamente o número de enrolamentos das bobinas emissora e receptora para $N=1, 3, 5, 7$ e 10 .

- *Variação da distância entre os enrolamentos da bobina (2c):* demonstra o comportamento da eficiência em função da frequência variando-se a distância entre os enrolamentos (2c) da bobina emissora e receptora para 1 cm, 2 cm, 3 cm, 4 cm e 5 cm.
- *Análise da eficiência em relação a distância de separação d, com $N=10$ espiras no emissor e receptor:* desenvolve uma análise da eficiência em função da frequência para $N=10$ espiras no sistema emissor e no receptor, e variando-se a distância de separação d para 10 cm, 30 cm, 50 cm e 2 metros.

3.1. Análise da eficiência em relação a distância de separação d, com uma espira no emissor e receptor

Com o objetivo de validar as simulações numéricas, a análise foi realizada utilizando uma antena quadro com uma espira para o sistema emissor e receptor. Isto se deve ao fato de que com uma única espira é possível comparar o sistema simulado com o analítico, visto que o método de Grover, equação (2.5), só possibilita o cálculo analítico da indutância mútua com antenas de uma espira, sendo o cálculo para mais de uma espira utilizar as simulações numéricas.

Baseando-se nas equações (2.8), (2.9) e (2.10) que garantem uma alta eficiência, foram realizados os cálculos analíticos e a investigação numérica para a variação da distância entre o sistema emissor e receptor.

A fim de se manter uma similaridade com trabalhos prévios descritos na literatura, adotaram-se os mesmos parâmetros físicos de construção para as bobinas apresentados em [3]. Para se assemelhar o mais próximo da realidade para elaboração futura de experimentos práticos, utilizou-se um parâmetro real da resistência do gerador ($R_s = 0 \Omega$), visto que experimentalmente se utilizará amplificadores com baixa impedância de saída. Para ambos os casos, simulado e analítico, a frequência analisada foi entre 0,2 MHz a 20 MHz.

Os parâmetros que se mantiveram fixos durante todos os cálculos estão listados na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Parâmetros fixos adotados nos cálculos

Parâmetros	Valores
V_s [Vac]	1
R_s [Ω]	0
$C_{1,2}$ [pF]	50
b [cm]	1
R_L [Ω]	500

A elaboração do modelo para simulação foi realizado utilizando a geometria 2D com simetria no eixo z. As antenas estão envoltas numa região de ar, conforme observado na Figura 3.2.

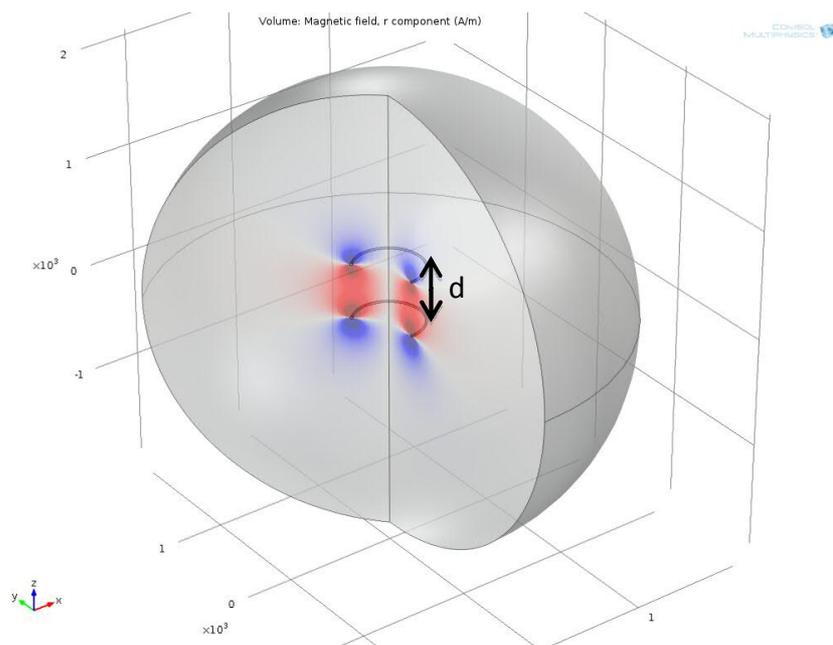


Figura 3.2 - Modelo 3D simulado, exibindo o campo magnético na componente paralela a espira da bobina. Em vermelho está representado o campo magnético positivo e em azul o negativo. A esfera cinza representa a região de ar envolta da bobina.

Foram elaboradas simulações onde as bobinas possuem características eletromagnéticas do cobre, ouro e prata, respectivamente. As características foram extraídas da biblioteca de elementos do software Comsol Multiphysics, e foi adotada uma distância de separação $d = 10$ cm, conforme exibido na Figura 3.3:

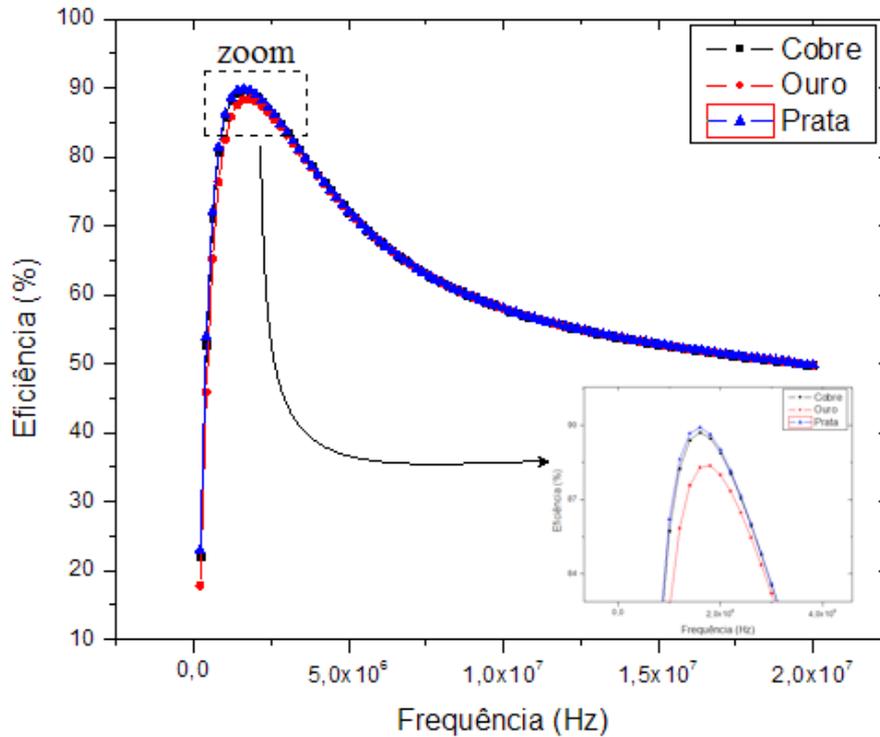


Figura 3.3 – Medições para bobinas com três materiais distintos, cobre, ouro e prata.

Nota-se que os valores de eficiência ficaram muito próximo para os 3 materiais, porém o ouro apresentou uma eficiência mais baixa em comparação ao cobre, e a prata apresentou uma eficiência mais elevada que bobina de cobre. Isto se deve principalmente ao fato da condutividade da prata ser a mais elevada ($\sim 6,17 \cdot 10^7$ S/m), seguida pela condutividade do cobre ($\sim 5,80 \cdot 10^7$ S/m) e posteriormente pela do ouro ($\sim 4,10 \cdot 10^7$ S/m).

Devido a disponibilidade e viabilidade do uso do cobre, todos os demais ensaios foram realizados adotando antenas com características eletromagnéticas do cobre.

Foi realizada a variação da distância, d , considerando quatro situações distintas: $d = 10$ cm, 25 cm, 50 cm e 200 cm. Os resultados obtidos pela simulação numérica estão apresentados na Figura 3.4.

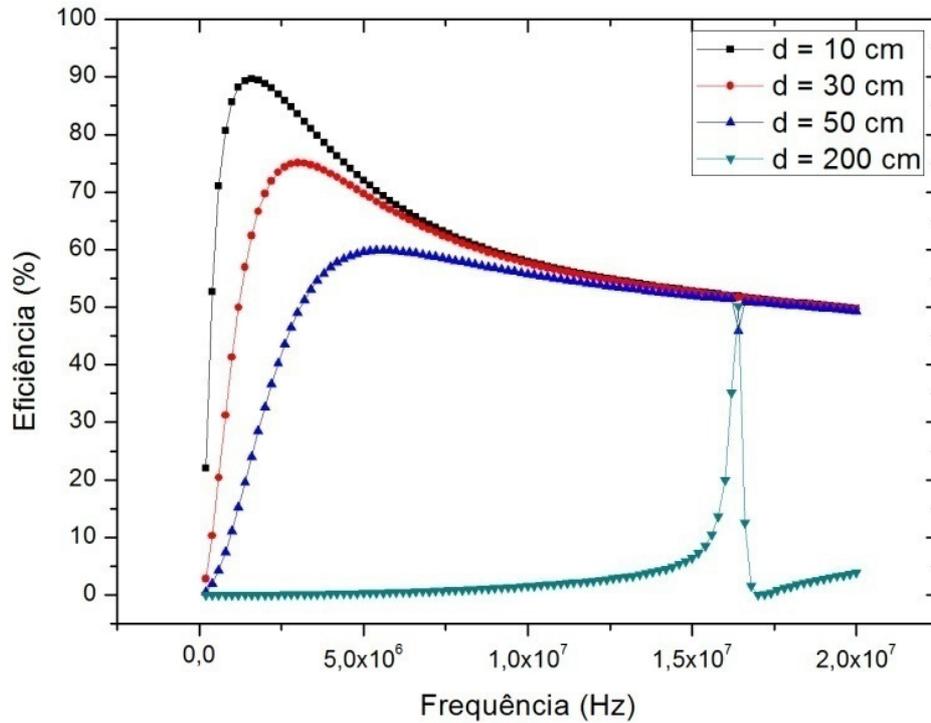


Figura 3.4 - Eficiência simulada para distância, d , entre as bobinas variando em quatro valores: 10 cm, 25 cm, 50 cm e 200cm.

Conforme observado na Figura 3.4 a eficiência na transmissão de energia aumenta conforme o sistema se aproxima, ou seja, quanto menor o valor de d , maior a eficiência do sistema. Isto se deve ao aumento do coeficiente de acoplamento, k , que é inversamente proporcional a distância (Equações 2.5 e 2.6). Neste caso, uma maior eficiência foi apresentada na frequência próxima a 1,6 MHz.

A variação da frequência de ressonância ocorre devido à variação da indutância mútua, que acarreta na alteração da indutância total do sistema e, conseqüentemente, na alteração da frequência de ressonância.

Conforme analisado, nota-se, ainda, que na condição de, $d = 200$ cm, o sistema fica muito seletivo. Uma pequena alteração na frequência ou no valor de, d , é suficiente para diminuir bruscamente o valor da eficiência. A

Tabela 3.2 exhibe as eficiências máximas do sistema para os diferentes valores de d :

Tabela 3.2 - Máximas eficiências encontradas para $N = 1$ em diferentes valores de d

Distância d (cm)	Frequência (MHz)	Máxima Eficiência (%)
10	1,6	89,69
30	3,0	75,08
50	5,6	59,86
200	16,4	50,12

A Tabela 3.3 apresenta a análise comparativa do sistema na condição de máxima eficiência (equações (2.8), (2.9) e (2.10)), considerando o caso simulado e o analítico. O sistema apresentou a mais alta eficiência na frequência de 1,6 MHz para uma distância $d = 10$ cm.

Tabela 3.3 - Condições para alta eficiência para Frequência de 1,6 MHz e distância $d = 10$ cm.

	Analítico	Simulado
ωM_{12} (Ω)	4,6879	4,6979
$(\omega M_{12})^2$ (Ω^2)	21,976	22,070
$R_1 R_2$ (Ω^2)	$9,4819 \cdot 10^{-5}$	$2,5678 \cdot 10^{-5}$
R_1 (Ω)	0,009737	0,005067
R_2 (Ω)	0,009737	0,005067
R_L (Ω)	500	500
η (%)	81,86	89,70

Os valores calculados pelo método analítico em comparação a simulação numérica, apresentam uma variação de eficiência de aproximadamente 8%. Este fato

ocorre pelo fato das equações adotadas de [32] não considerarem a resistência mútua, que é uma resistência que surge mutuamente no sistema transmissor e receptor devido a proximidade das antenas e geralmente é muito baixa, por isto o valor de R_1 e R_2 divergiram.

Buscam-se atingir as três condições para se obter máxima eficiência (equações (2.8), (2.9) e (2.10)). Analisando a Tabela 3.3, verifica-se que a terceira condição não foi totalmente satisfeita. Este fato reduz a eficiência do sistema, deixando-a mais distante do 100%.

3.2. Variação do raio da bobina receptora

Para este caso, a distância de separação 'd' entre as bobinas foi mantida fixa em 10 cm. O raio da bobina receptora foi modificado, utilizando 15 cm, 30 cm e 45 cm, ambos com o raio da seção transversal do fio constante, igual a 1 cm. A bobina transmissora foi mantida com raio fixo de 30 cm e mesma bitola da bobina receptora. A Figura 3.5 apresenta a eficiência obtida em função da variação do raio da bobina receptora.

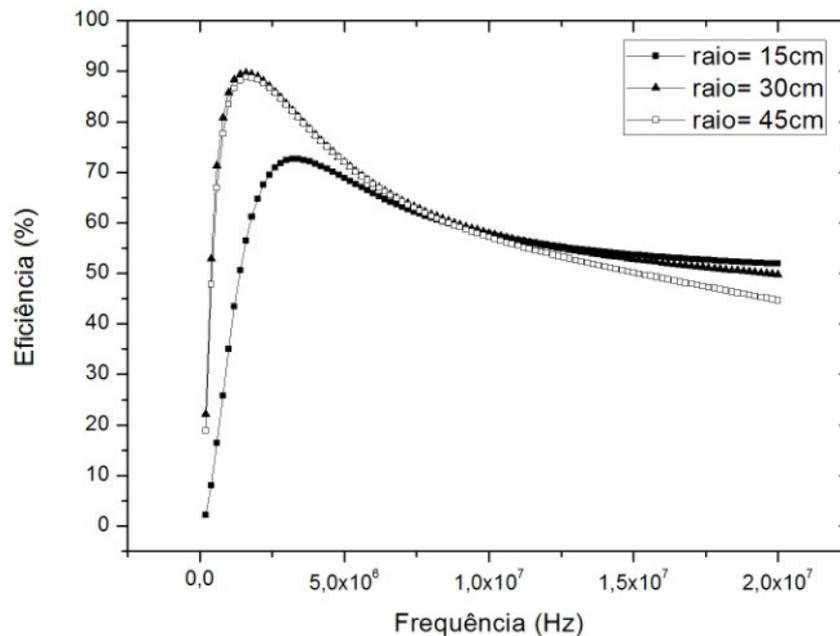


Figura 3.5 - Gráfico da eficiência para raios da bobina receptora de 15 cm, 30 cm e 45 cm.

A Figura 3.5 demonstra que a máxima eficiência para o sistema é obtida quando temos ambas as bobinas com mesmo raio, ou seja, bobinas idênticas para emissão e recepção de energia. A eficiência da bobina para $r = 45$ cm obteve apenas uma pequena variação advinda das perdas devido ao maior comprimento da espira, visto que a bobina também consegue captar todo o fluxo magnético advindo da bobina transmissora.

Ao modificar o raio da bobina, modifica-se diretamente a indutância da antena, a indutância mútua e o coeficiente de acoplamento do sistema, acarretando, portanto, em uma diminuição do coeficiente de acoplamento e, conseqüentemente, uma redução na eficiência.

3.3. Variação no número de enrolamentos das bobina emissora e receptora (N)

Na física de campos magnéticos, no software COMSOL, variou-se a quantidade de enrolamentos em ambas as bobinas. Porém, a variação se deu de maneira conjunta, ou seja, o número de anéis de enrolamento da antena transmissora (bobina 1) é mantido igual ao número de espiras da antena receptora (bobina 2). Estas modificações implicam diretamente na alteração dos parâmetros do sistema, como: L_1 , L_2 e M_{12} (Figura 2.1).

Na física de circuitos elétricos foi desenvolvido o restante do circuito emissor e receptor, mantendo os mesmos parâmetros fixos listados na Tabela 3.1 e com o raio da bobina igual a 30 cm. A malha discretizada utilizada nas simulações possui uma alta densidade de elementos, garantindo resultados precisos nas simulações.

Foi realizada a variação do número de espiras, N , considerando cinco situações distintas, N igual a 1, 3, 5, 7 e 10. As espiras da bobina emissora e receptora foram alteradas simultaneamente. A distância de separação entre os extremos das bobinas, d , o raio, a , e a separação entre dois enrolamentos consecutivos da bobina, $2c$, foram, a princípio, mantidas fixas, com: 2m, 30cm, e 2cm, respectivamente. Os resultados obtidos pela simulação numérica estão apresentados na Figura 3.6.

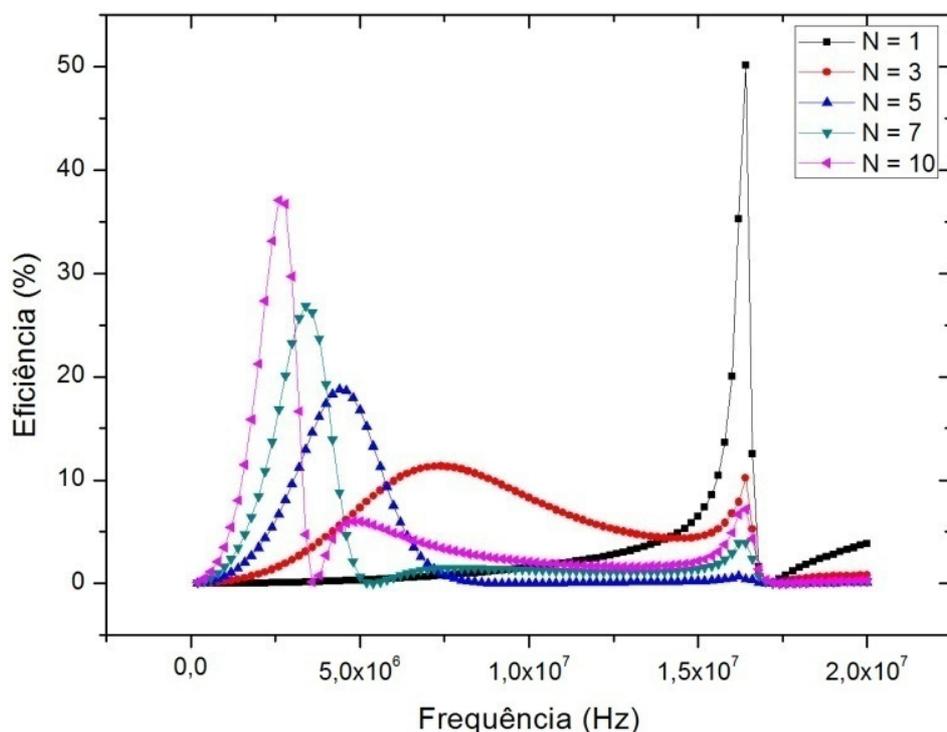


Figura 3.6 - Eficiência simulada variando o número de espiras: N= 1 (linha preta, símbolo quadrado), N= 3 (linha vermelha, símbolo círculo), N= 5 (linha azul, símbolo triângulo para cima), N= 7 (linha verde, símbolo triângulo para baixo) e N= 10 (linha rosa, símbolo triângulo lateral).

Conforme observado na Figura 3.6, notam-se dois grupos distintos de picos de eficiência. O primeiro apresenta uma eficiência máxima de 37,1% na frequência entorno de 2,6 MHz, para a condição de $N = 10$ e possui uma sensibilidade a variação de frequências de aproximadamente 2 MHz. O segundo grupo apresenta uma eficiência máxima de 50,12 % na frequência entorno de 16,4 MHz para a condição de $N = 1$, porém, possuindo uma largura espectral de aproximadamente de 500 kHz.

Embora o sistema apresente uma maior eficiência na condição de $N = 1$, pequenas variações na distância de separação entre as bobinas (d), acarretam numa alteração direta no valor da indutância mútua [34]. Observando as condições para obtenção de alta eficiência (equações (2.8), (2.9) e (2.10)) conclui-se que uma maior largura espectral torna o sistema mais atrativo para implementação experimental, pois facilita manter o sistema em ressonância. Ademais, existe grande dificuldade de se

manter a eficiência elevada na frequência de 16,4 MHz, pois qualquer variação mínima desta frequência reduz bruscamente a eficiência do sistema.

3.4. Variação da distância entre os enrolamentos da bobina (2c)

Variou-se a distância entre os enrolamentos da bobina, $2c$, (Figura 2.3) para valores entre 1 cm e 5 cm. As espiras da bobina emissora e receptora foram alteradas simultaneamente. A distância analisada foi mantida fixa de 2 metros, com raio $a = 30$ cm, e $N = 10$ (um dos melhores casos da Figura 3.6). Os resultados obtidos pela simulação numérica estão apresentados na Figura 3.7.

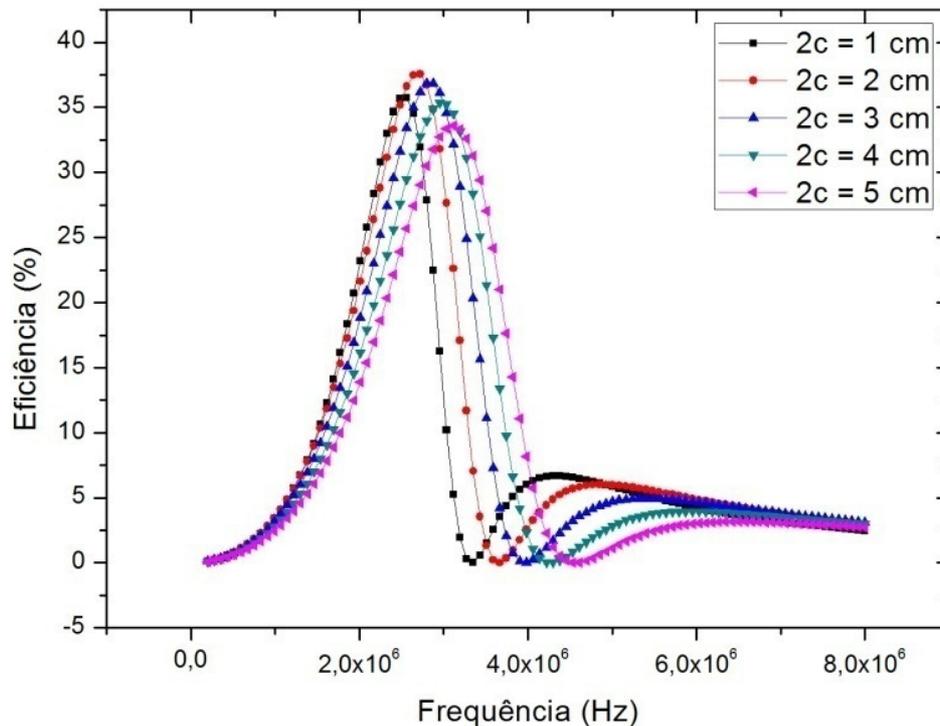


Figura 3.7 - Eficiência simulada variando a distância de separação dos enrolamentos $2c$ de 1 cm a 5 cm.

Observando a Figura 3.7, nota-se que a máxima eficiência obtida foi de 37,1 % na frequência de 2,6 MHz, na condição de $2c = 2$ cm, ou seja, o mesmo valor de do diâmetro da bitola da bobina, $2b$. Porém, uma incerteza de ± 1 cm não afeta de maneira relevante o valor da eficiência, que cai de 37,1 % para 31,9 % ($2c = 1$ cm) e 36,2 % ($2c = 3$ cm), mantendo-se a frequência de 2,6 MHz.

3.5. Análise da eficiência em relação a distância de separação d , com $N = 10$ espiras no emissor e receptor

Foram analisadas as distâncias de separação entre as bobinas emissora e receptora para o caso extremo de máxima eficiência (Figura 3.6), para $N = 10$ com $2c = 2$ cm. A variação da distância d foi realizada considerando quatro situações distintas: $d = 10$ cm, 30 cm, 50 cm e 200 cm. Os resultados obtidos pela simulação estão apresentados na Figura 3.8, para o caso de $N = 10$.

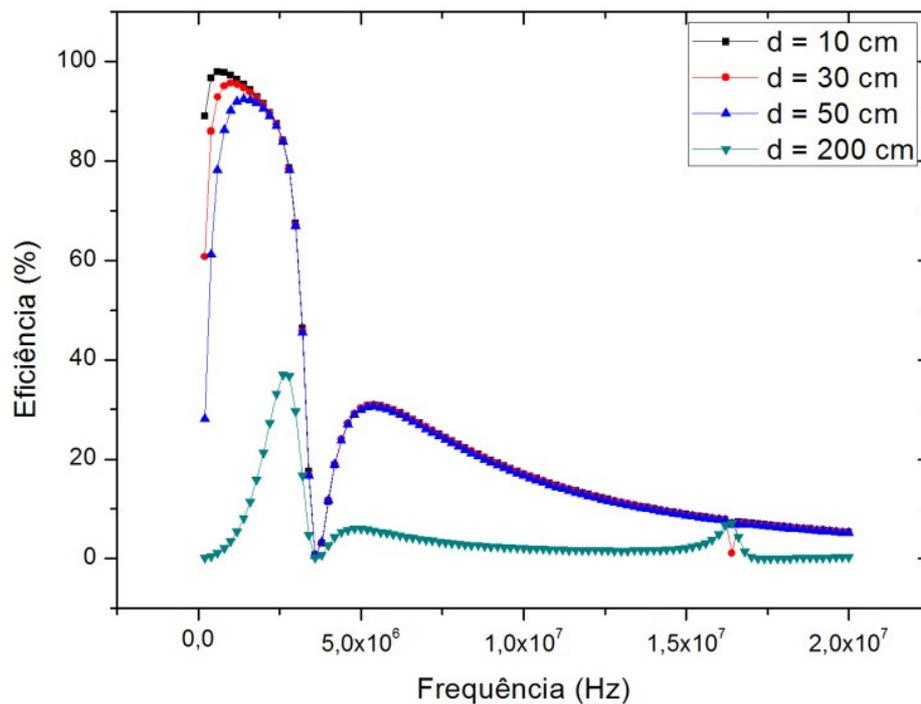


Figura 3.8 - Eficiência simulada variando a distância d para 10 cm, 30 cm, 50 cm e 200 cm, número de espiras por bobina (N) igual a 10.

A Figura 3.8 demonstra que a máxima eficiência para o sistema é obtida quando a distância, d , reduz. Conforme descrito anteriormente, isto é devido ao aumento do coeficiente de acoplamento, k , que é inversamente proporcional a distância.

Novamente, a variação da frequência de ressonância ocorre devido à variação da indutância mútua, que acarreta na alteração da indutância total do sistema gerando alteração da frequência de ressonância [31],[34].

Ademais, nota-se, ainda, que na condição de $d = 200$ cm, o sistema apresenta uma largura espectral superior à obtida na Figura 3.4 ($N=1$ e frequência de 16,4 MHz), isto se deve ao fato do sistema com mais enrolamentos apresentar uma resistência interna maior, o que diminui o fator de qualidade Q do sistema e conseqüentemente aumenta a largura de banda tornando o sistema menos seletivo, o que na prática em alguns casos pode ser desejável. A Tabela 3.4 lista as eficiências máximas do sistema para os diferentes valores adotados de separação, d :

Tabela 3.4 - MÁXIMAS EFICIÊNCIAS ENCONTRADAS PARA $N = 10$ EM DIFERENTES VALORES DE D

Distância d (cm)	Frequência (MHz)	Máxima Eficiência (%)
10	0,6	97,87
30	1	95,62
50	1,4	92,43
200	2,6	37,10

Os resultados obtidos mostram valores de eficiência acima de 90% a distâncias de até 50 cm. O resultado a 200 cm apresentou um valor abaixo do resultado mostrado na Figura 3.4. Ou seja, considerando o caso fixo para $d = 200$ cm, o aumento no número de espiras deslocou o pico para uma frequência mais baixa, reduziu a eficiência, porém aumentou a largura espectral. Isto ocorreu pelo fato da antena com mais enrolamentos apresentar uma resistência interna mais elevada que o modelo anterior o que resulta diretamente numa diminuição do valor máximo do pico de ressonância. Este fato é extremamente relevante, e deve ser considerado na confecção de experimentos práticos.

Diante dos resultados obtidos, é possível desenvolver um projeto experimental adequado, já prevendo a eficiência desejada. Deve-se ter em mente que o valor obtido experimentalmente sofrerá alterações, devido a variações existentes da qualidade dos materiais, confecção das antenas (não uniformidade), incertezas dos componentes e outros. O Capítulo 4 demonstrará as dificuldades e incertezas obtidas para confecção do sistema experimental.

4. PROJETO E IMPLEMENTAÇÃO

Após a realização das simulações numéricas e validação das mesmas pelas equações analíticas foi desenvolvido experimentalmente o modelo para transmissão de energia sem fios.

O primeiro passo para desenvolver o projeto prático foi levantar e/ou adquirir os equipamentos necessários para implementação, e, diante dos mesmos, desenvolver o projeto de acordo com as características disponíveis nos equipamentos.

Para fins de implementação foram disponibilizados:

Tabela 4.1 – Lista de equipamentos disponíveis para uso.

Equipamento	Características Principais
1 Gerador de Funções - BK Precision 4017A	Frequência de Geração de até 10 MHz
1 Osciloscópio – Agilent Technologies MSO-X 2002A	Frequência de Medição de até 70 MHz 2 GSa/s
1 Analisador de Rede - DG8SAQ VNWA v3	Faixa de Medição de até 1,3 GHz
1 Fonte de Tensão DC - BK Precision 1735A	30Vdc / 3A
1 Amplificador CTE-747 - CTE	Faixa de operação HF Potência de Entrada de 0,5-10W Potência de Saída de até 100W Alimentação 13,8 Vdc
1 Amplificador de RF Universal de 1W (confeccionado – ANEXO III)	Entrada de 13 dbm e saída de 1W.

O projeto fará uso de todos os equipamentos descritos na Tabela 4.1 e foi desenvolvido seguindo as seguintes etapas:

- *Requisitos do Sistema:* diante dos equipamentos disponíveis, definiu-se as características passíveis de serem implementadas e a partir disto confecciona-se as antenas.
- *Projeto do Sistema Transmissor e Receptor:* mede-se experimentalmente todos os componentes disponíveis para uso no sistema transmissor e receptor, a fim de obter os valores reais dos mesmos e diante de tais resultados, monta-se o projeto do sistema transmissor e receptor.
- *Implementação do Sistema:* descreve a execução do projeto, abrangendo as etapas de montagem, medições e ensaios, demonstrando ao final o sistema funcionando.

4.1. Requisitos do Sistema

A fim de elaborar um sistema simplificado para validação do modelo de transmissão de energia sem fios, e diante dos equipamentos disponíveis, propôs-se o projeto com as seguintes características:

- Sistema para transmissão de energia sem fios operando na faixa de aproximadamente 9 MHz, objetivando uma alta frequência, porém um valor que não seja próximo da frequência máxima do gerador disponível, para se obter um alcance razoável para variação de frequência.
- Antenas de emissão e recepção com diâmetro em torno de 25 cm, diâmetro da bitola de 6 mm e uma espira de enrolamento cada, para facilitar a construção da antenas. O material utilizado será tubos de refrigeração ocos, devido a indisponibilidade de fios sólidos.
- Tensão de entrada advinda do gerador deve ser de 5 Vpp;
- A carga resistiva pode ser uma lâmpada;
- O sistema será elaborado baseando-se no modelo da Figura 2.1, sendo que a fonte de tensão alternada será o gerador de funções em cascata com o amplificador de RF universal de 1W e o amplificador cte-747.
- Deve-se medir a eficiência do sistema, adotando distâncias de 2,5 cm a 20 cm.

Diante de tais características se iniciou o desenvolvimento do experimento. O primeiro passo foi produzir as antenas emissora e receptora (Figura 4.1):



Figura 4.1 – Antena do transmissor confeccionada, tipo espira com um enrolamento, diâmetro de 23 cm e bitola do fio de 6 mm.



Figura 4.2 - Antena do receptor confeccionada, tipo espira com um enrolamento, diâmetro de 23 cm e bitola do fio de 6 mm.

Com isso, calcula-se o valor da impedância da antena pelo método analítico [32], simulado (Comsol) e experimental através do analisador de rede. Os valores dimensionais são exibidos na

Tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Características das dimensões das antenas.

Características	Dimensões (mm)
Raio da bitola da antena (b)	3
Raio médio da Antena Transmissora (a_t)	110
Raio médio da Antena Receptora (a_r)	115

Os valores das indutâncias da antena são exibidos na Tabela 4.3:

Tabela 4.3 - Valores das indutâncias pelo método analítico, simulado e experimental.

Grandeza	Analítico	Simulado	Experimental
Indutância Antena 1 - L_1 (nH)	508,87	500,82	518,00
Indutância Antena 2 - L_2 (nH)	538,42	529,60	547,00

Os valores experimentais apresentaram uma diferença máxima de 3,4%, isto se deve ao fato do cobre utilizado nos experimentos ter aplicação típica para refrigeração (tubo oco) e não aplicações para fins elétricos. Além disso, os demais parâmetros do circuito (como conexões, bornes e outros componentes) apresentaram resistências internas consideráveis comparadas aos valores das resistências internas das bobinas, e,

assim, estas não foram medidas. Para os cálculos de R_1 e R_2 serão adotados os valores finais de resistência obtidos por meio do analisador de rede.

4.2. Projeto do Sistema Transmissor e Receptor

Adotando como referência os valores obtidos experimentalmente foi projetado o sistema para ressonar na frequência de 9 MHz. Utilizou-se para o sistema transmissor $L_1 = 518$ nH (Tabela 4.3), e, baseando-se na equação (4.1):

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (4.1)$$

o valor da capacitância foi: $C = 604$ pF. Utilizando componentes comerciais disponíveis, utilizou-se um capacitor cerâmico de 560 pF em paralelo com um capacitor de 56pF, totalizando $C_1 = 616$ pF.

Analogamente, para o sistema receptor a indutância experimental foi: $L_2 = 547$ nH, obtendo um valor de capacitância $C = 571$ pF. Experimentalmente, utilizou-se um capacitor cerâmico de 560 pF em paralelo com um capacitor de 20 pF, totalizando $C_2 = 570$ pF.

A medição experimental é realizada por meio do analisador de rede. Nesta medição inclui o valor obtido dos capacitores juntamente com elementos do circuito como (bornes e conexões), os valores são exibidos na Tabela 4.4:

Tabela 4.4 – Comparação dos valores dos capacitores, Adotado x Medido Experimentalmente.

	Valor Referência	Valor Medido
C_1	616 pF	551,9 pF
C_2	570 pF	674 pF

Mediu-se, também, o valor da resistência interna do sistema, obtendo o valor de $R_1 = 4,37 \Omega$ e $R_2 = 2,49 \Omega$. O valor de R_1 foi 75,5% maior que R_2 , devido aos cabos e bornes utilizados para conectar o sistema transmissor ao amplificador.

Como carga R_L foi adotada uma lâmpada de 1,2W, e a resistência da mesma foi medida a frio resultando em $R_L = 1,83 \Omega$.

Com isso, o seguinte sistema pode ser exemplificado conforme Figura 4.3:

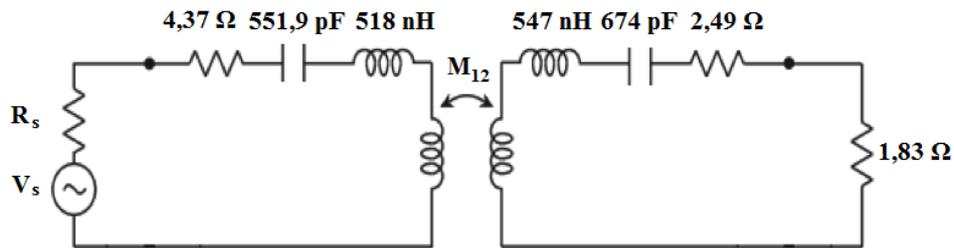


Figura 4.3 – Sistema para transmissão de energia sem fios projetado

4.3. Implementação do Sistema

Foi feita a montagem do sistema projetado no subitem 4.2 (Figura 4.3). Com o protótipo montado, foi, então, feita a investigação experimental da eficiência do sistema. Todos os valores necessários para o cálculo da eficiência (equação (2.7)) foram determinados de forma analítica, por meio de simulação numérica e comparados com os valores experimentais obtidos.

O primeiro item analisado foi a indutância mútua (M_{12}) para os casos simulado e analítico. Analiticamente a indutância mútua é calculada pela equação (2.5), que foi implementada no software Matlab (ANEXO I). As simulações numéricas foram realizadas utilizando o software comercial COMSOL Multiphysics. Analogamente as simulações desenvolvidas no Capítulo 3, foram utilizados o módulo ACDC do software e a geometria 2D com simetria no eixo z. O software permite a integração da física de Campos Magnéticos (Magnetic Fields) e a física de Circuitos Elétricos (Electric Circuit). Na física de campos magnéticos foram investigadas as antenas utilizadas na transmissão e recepção, e na física de circuitos elétricos foram simulados os demais componentes do modelo.

A indutância mútua foi obtida variando-se a distância, d , (entre bobinas) em 2,5 cm, 4 cm, 6 cm, 8 cm, 10 cm, 12 cm, 14 cm, 16 cm, 18 cm e 20 cm. Os valores obtidos são exibidos na Tabela 4.5:

Tabela 4.5 - Tabela de valores da indutância mútua calculada analiticamente e numericamente, para distâncias de 2,5 cm a 20 cm.

Distância (d) [cm]	M_{12} – Analítico [nH]	M_{12} – Numérico [nH]	Diferença (%)
2,5	225,39	212,53	5,705
4	165,62	174,63	5,440
6	117,28	136,00	15,96
8	86,470	107,86	24,73
10	65,401	86,433	32,17
12	50,408	70,100	39,06
14	39,456	57,400	45,47
16	31,299	47,475	51,68
18	25,128	39,636	57,73
20	20,396	33,377	63,64

Analisando os valores da tabela acima, pode-se justificar a diferença entre os valores analítico e simulado numericamente devido ao fato que no valor analítico o condutor (antena) foi considerado como sendo um material maciço, enquanto que, no simulado, a antena foi considerada como sendo um tubo de cobre oco, idêntico ao experimento.

Observa-se o crescimento da diferença entre os valores, conforme há um incremento na distância de separação d , isto se deve ao fato do campo magnético gerado externamente divergir para os diferentes materiais, e esta diferença se torna mais relevante conforme há um incremento na distância d , visto que em maiores distâncias o campo magnético transmitido deve ser o mais intenso possível, a fim de gerar um maior valor de indutância mútua

Diante dos valores da indutância mútua (M_{12}) obtidos, o sistema representado pela Figura 4.3 obtém um aumento de indutância ($L_1 + M_{12}$ e $L_1 + M_{12}$), ou seja, o

sistema não passa mais a ressonar na frequência de projeto de 9MHz. A nova frequência de ressonância foi calculada utilizando a equação (4.1), e passa a ser, para o sistema transmissor, de aproximadamente 7,9 MHz e para o sistema receptor de 7,1 MHz.

A ressonância do sistema deve ser idêntica, no sistema transmissor e receptor, para se obter a máxima eficiência na frequência projetada. Uma análise experimental nos mostra que caso o sistema receptor ressoe em uma frequência X e o transmissor em uma frequência Y, o sistema terá uma máxima eficiência na frequência de ressonância do sistema receptor (X), visto que nesta frequência a carga receberá uma maior quantidade de energia. Logo, o sistema projetado irá operar com maior eficiência na frequência de aproximadamente 7,1 MHz. Porém, o sistema transmissor não obterá uma maior corrente na frequência de 7,1 MHz, visto que o mesmo ressoa em 7,9 MHz.

Realizar a sintonia dos dois circuitos não é uma tarefa simples, visto as impedâncias parasitas, as diferentes impedâncias de entrada e saída, e a irregularidade dos componentes utilizados. Assim sendo, não foram alterados os componentes para forçar o sistema a ressonar em 9 MHz, visto que alterações nos componentes do circuito não alteram de maneira trivial os valores da impedância. Logo, a implementação foi feita para a frequência de 7,1 MHz. O resultado da implementação pode ser visualizado pela Figura 4.4, com a lâmpada acesa na frequência de projeto a uma distância de 4 cm.

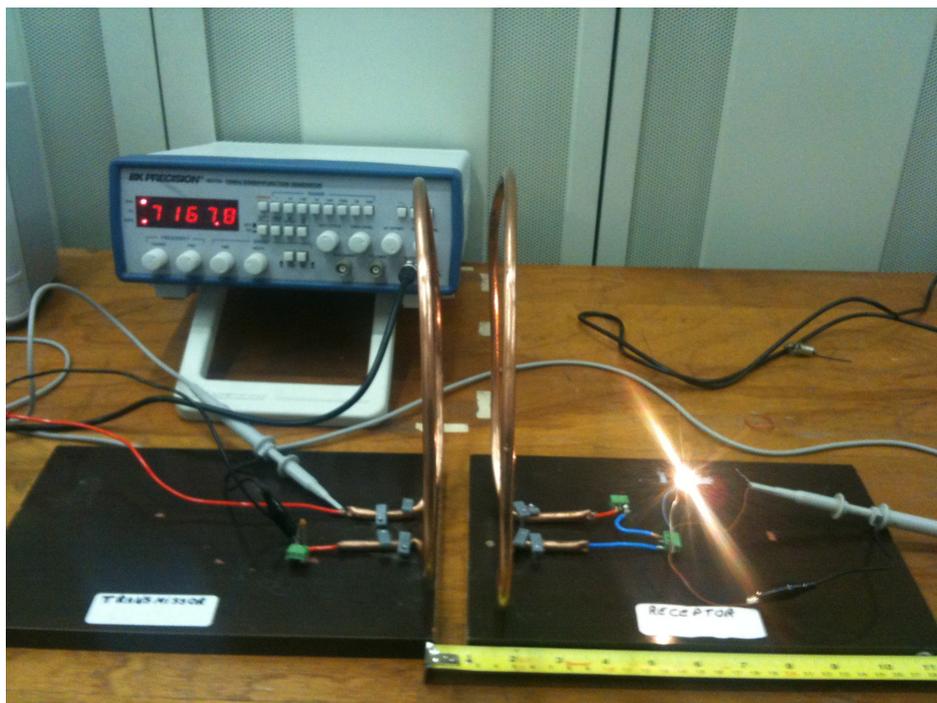


Figura 4.4 - Sistema operando na frequência de 7,16 MHz, para a distância de separação de 4 cm.

O objetivo de acionar a carga R_L (lâmpada) foi atingido, porém o sistema não permaneceu operante sobre distâncias muito elevadas, visto que em cerca de 15 cm a lâmpada se apaga. Uma análise mais detalhada será desenvolvida no Capítulo 5, onde será analisada a eficiência que o sistema atinge, e será explanado com mais detalhes os motivos do sistema não operar em um alcance maior.

5. ANÁLISE DO PROTÓTIPO EXPERIMENTAL

Para uma análise detalhada dos resultados obtidos experimentalmente, foi calculada a eficiência do sistema de forma analítica, numérica e experimental. A eficiência analítica e simulada numericamente podem ser obtidas através da equação (2.7), utilizando como base os valores adotados na Figura 4.3 e nas Tabela 4.1 a 4.5.

A eficiência experimental foi calculada utilizando como base o mesmo método utilizado por Choi e coautores [38]. Utilizou-se o analisador de rede injetando um sinal de 0 dB no sistema transmissor e analisando o parâmetro S21 no sistema receptor. Com isso, foi possível calcular a eficiência do sistema, visto que se tem conhecimento do valor do sinal de entrada em função do parâmetro S21. O resultado obtido para o sistema operando numa distância de 2,5 cm é exibido na Figura 5.1. A curva em rosa representa os valores de S11 e a curva em marrom os dados do parâmetro S21, o sistema ressona na frequência de 7,15 MHz:

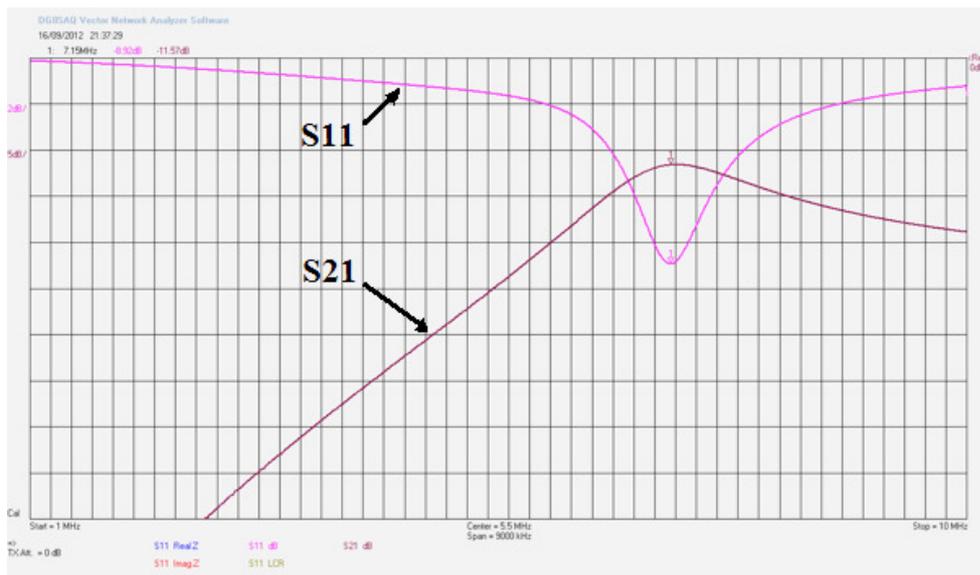


Figura 5.1 – Figura da análise do sistema acoplado para distância de 2,5 cm. Em rosa está o parâmetro S11 em dB e em marrom está o parâmetro S21 em dB.

Os resultados obtidos para os parâmetros S11 e S21 são listados na Tabela 5.1, para as distâncias analisadas:

Tabela 5.1 – Parâmetros S11 e S21 medidos para o sistema acoplado a distâncias de 2,5 a 20 cm.

Distância (d) [cm]	S11 [dB]	S21 [dB]
2,5	-13,87	-5,02
4	-12,69	-5,39
6	-11,54	-6,34
8	-11,06	-7,35
10	-10,85	-8,19
12	-10,71	-9,21
14	-10,64	-10,0
16	-10,60	-10,8
18	-10,59	-11,7
20	-10,56	-12,5

Com as eficiências analítica, simulada e experimental calculadas, pode-se traçar um gráfico da eficiência em função da distância, exibindo os resultados alcançados conforme Figura 5.2:

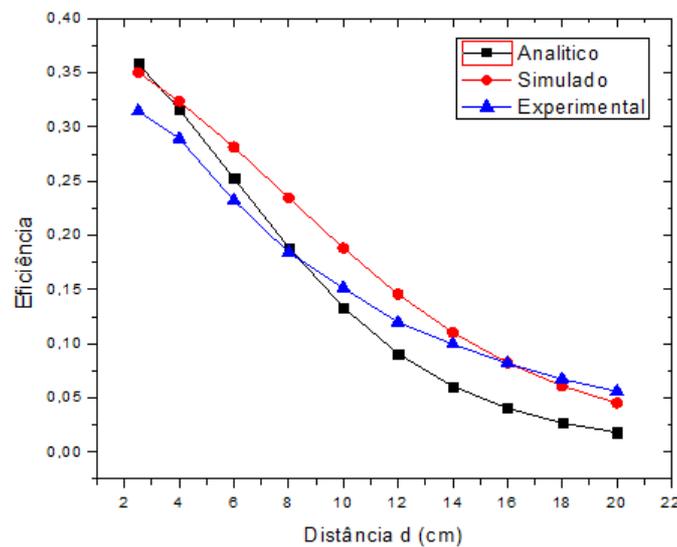


Figura 5.2 – Gráfico da eficiência em função da distância, para os casos analítico, simulado e experimental.

Conforme observado na Figura 5.1, os resultados analítico, simulado e experimental apresentaram valores muito próximos, validando o modelo de simulação

numérica desenvolvido no software Comsol Multiphysics, o modelo proposto por Thomas e coautores [9],[11] e o protótipo experimental.

Os valores de eficiência obtidos neste protótipo podem ser justificados analisando as condições para se obter alta eficiência [9,11]. Para facilitar as análises de alta eficiência, a

Tabela 5.2 resume os parâmetros utilizados nas equações (2.8), (2.9) e (2.10):

Tabela 5.2 - Condições para alta eficiência para frequência de 7,17 MHz e distância $d = 2,5$ cm.

	Analítico	Simulado
ωM_{12} (Ω)	10,15	9,574
$(\omega M_{12})^2$ (Ω^2)	103,1	91,67
$R_1 R_2$ (Ω^2)	10,88	
R_1 (Ω)	4,37	
R_2 (Ω)	2,49	
R_L (Ω)	1,83	
η (%)	0,3580	0,3502

Analisando detalhadamente as condições tem-se:

- A condição $(\omega M_{12})^2 \gg R_1 R_2$, não é atingida pois o termo ωM_{12} , apresentou um valor muito baixo. Isso se deve a frequência que o sistema operou (7,17 MHz) e, principalmente, a baixa indutância mútua do sistema. Isto se deve ao fato da antena transmissora possuir apenas uma única espira e possuir dimensões reduzidas. Embora $R_1 R_2$ tenham um baixo valor, os mesmos não foram reduzidos o suficiente para atingir a primeira condição.
- A condição $R_L \gg R_1, R_2$, não foi atingida pelo fato do sistema projetado objetivar acender uma lâmpada que possuía uma baixa resistência.
- A condição $R_L \approx \omega M_{12}$, apresentou uma relação vezes dez, o termo da indutância mútua foi aproximadamente 10 vezes maior que R_L , ou seja, a condição não foi satisfeita.

Comparando o resultado obtido com outros na literatura [7-9][36][37], temos:

Tabela 5.3 – Comparação do resultado prático com outros trabalhos.

	Este Trabalho	[7]	[8]	[9]	[36]	[37]
Frequência (MHz)	7,17	15,9	7,95	38	9,45	1,072
Raio (a) (cm)	11,5	15	29,5	10,7	3,5	9
Número de Espiras (N)	1	5	6	1	6	2
	Eficiência Atingida					
d = 3 cm	31 %	96 %	83 %	8 %	90 %	95 %
d = 13 cm	7,5 %	94 %	81 %	37 %	5 %	62 %

O valor obtido experimentalmente apresentou uma eficiência consideravelmente baixa com relação aos demais experimentos. Os trabalhos [7], [9] e [37], desenvolveram um sistema de sintonia, sendo que em [9] um novo sistema foi projetado para cada distância que o sistema operou, no caso particular, otimizado para 20 cm. Os trabalhos [7] e [37] não apresentaram detalhes explicativos do projeto. O trabalho desenvolvido por Sample e coautores [8] foi desenvolvido com 4 bobinas com 6 espiras no total, sendo duas na transmissão e duas na recepção, o que provou ser um sistema muito eficiente para distâncias médias (algumas vezes o raio da bobina).

Por fim, vale mencionar, que o objetivo do experimento desenvolvido neste trabalho foi alcançado, que era comprovar a viabilidade da técnica de transmissão de energia sem fios. Embora o sistema não apresente uma eficiência alta em comparação aos demais trabalhos, o mesmo, ainda assim, apresenta uma eficiência elevada quando comparado ao modelo clássico de transmissão de energia por indução.

6. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Neste trabalho algumas análises foram realizadas a fim de se observar a viabilidade da implementação das técnicas para transmissão de energia sem fios. Foi validado um modelo por simulação e foi projetado e desenvolvido um sistema experimental simplificado para transmissão de energia sem fios por modos ressonantes.

Diante das análises desenvolvidas, tem-se que o sistema deve operar com antenas com baixo valor de resistência de irradiação, visto que a técnica de transmissão de energia sem fios por modos ressonantes opera no regime de campo próximo e transmite a energia por indução magnética.

Em uma análise com relação ao raio da bobina receptora, nota-se que bobinas com a mesma dimensão no sistema transmissor e receptor apresentam uma maior eficiência.

Com relação ao número de espiras ideal para o sistema transmissor/receptor, nota-se que bobinas com maior número de enrolamentos (N) se tornam mais atrativas para a implementação prática, visto que a largura de banda é maior. Com isso, pode-se haver uma variação um pouco maior na distância de separação entre o sistema emissor/receptor, fator muito relevante para dispositivos móveis.

Foi analisada a variação entre os enrolamentos nas bobinas emissora e receptora, o que resultou que bobinas com distância de separação entre os enrolamentos ($2c$) iguais ao diâmetro da bitola do fio ($2b$) tornam o sistema mais eficiente.

Ao realizar simulações de modelos de experimentos, chegou-se a conclusão que um sistema operando a 2 metros de distância pode ter eficiência de cerca de 50% utilizando uma única bobina transmissora e uma receptora ($N=1$), ou, por outro lado, uma eficiência de 37% utilizando bobinas com 10 enrolamentos ($N=10$). Porém o sistema com 10 enrolamentos provou ser mais viável de se implementar na prática, visto que o mesmo apresenta uma largura de banda de cerca de 2,5 MHz, enquanto o sistema com uma espira apresenta uma largura de banda de cerca de 500 kHz. Isto torna o sistema muito mais difícil de sintonizar na prática, além de que, uma pequena variação na distância de separação, d , altera drasticamente o valor da eficiência do sistema.

Ao desenvolver o modelo experimental simplificado, a máxima eficiência atingida foi de cerca de 31% a distância de 3 cm. Logo, o objetivo do trabalho foi alcançado: comprovar a viabilidade da técnica de transmissão de energia sem fios por modos ressonantes.

Este trabalho deixou em aberto a possibilidade de desenvolver técnicas e melhorias para aumentar sua eficiência em trabalhos futuros.

Como trabalhos futuros será implementado um sistema auto-sintonizante para realizar a sintonia do sistema conforme a variação da distância de separação (d). Esta auto-sintonia se dará por meio da implementação de um sistema de comunicação entre o sistema emissor e receptor, onde será possível implementar capacitores variáveis digitalmente e uma malha de controle para identificação e correção da frequência de sintonia.

Como sugestão para outros trabalhos fica a implementação de circuitos ressonantes específicos, que possibilita em certas regiões que haja um controle sobre a resistência do sistema, fator relevante para atingir as três condições para obtenção de alta eficiência.

REFERÊNCIAS

- [1] Tesla, N. “Apparatus for transmitting electrical energy.” U.S. patent number 1,119,732, Dezembro de 1914.
- [2] Ribeiro, J.A.J. “Propagação das Ondas Eletromagnéticas - Princípios e Aplicações”, Ed. Érica, 2008.
- [3] Karalis, A.; Joannopoulos, J.D. e Soljačić, M. “Efficient wireless non- radiative mid-range energy transfer”, ANNALS OF PHYSICS, Vol. 323 (2006).
- [4] Thompson, K. “Electricity in the Air”, Postado em 23/01/2008, Popular Science, 2008.
- [5] Kurs, A.; Karalis A.; Moffatt, R.; Joannopoulos, J.D.; Fisher, P.; Soljačić, M. “Wireless Power Transfer via Strongly Coupled Magnetic Resonances”, Science no.317, pp. 83-85, Junho de 2007.
- [6] Kurs, A.; Karalis A.; Moffatt, R.; Joannopoulos, J.D.; Fisher, P.; Soljačić, M. – “Wireless Power Transfer via Strongly Coupled Magnetic Resonances”, *Supporting Online Material*, Science Express, Junho de 2007.
- [7] Imura, T.; Okabe, H. e Hori, Y. “Basic experimental study on helical antennas of wireless power transfer for electric vehicles by using magnetic resonant couplings”, in Proc. IEEE Vehicle Power Propulsion Conf. 2009 , Sep. 2009, pp. 936–940.
- [8] Sample, A. P. ; Meyer, D. A. e Smith, J. R. “Analysis, experimental results, and range adaptation of magnetically coupled resonators for wireless power transfer,” IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 58, no. 2, pp. 544–554, 2011.
- [9] Thomas, E.M.; Heebl, J.D.; Pfeiffer, C. e Grbic, A. “A Power Link Study of Wireless Non-Radiative Power Transfer Systems Using Resonant Shielded Loops”, IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers, 2012.
- [10] Kim, K. Y. “Wireless Power Transfer – Principles and Engineering Explorations”, InTech, 2011.
- [11] Thomas, E.M.; Heebl, J.D. e Grbic, A. “Shielded loops for wireless non- radiative power transfer”, 2010 IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium (APSURSI), 2010.
- [12] Brown, W. C. “The History of Power Transmission by Radio Waves,” IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol. MTT-32, pp. 1230–1242, Setembro 1984.
- [13] Shimokura, N.; Kaya, N.; Shinohara, M. e Matsumoto, H. “Point-to-Point Microwave Power Transmission Experiment,” Electrical Engineering in Japan, vol. 120, no. 1, pp. 33–39, 1997.
- [14] Shimokura, N. and Matsumoto, H. “Study of Large Rectenna Array for Microwave Energy Transmission,” IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol. 46,

- pp. 261–268, March 1998.
- [15] Fujino, Y.; Fujita, M.; Kaya, N.; Kunimi, A.; Ishii, M.; Ogihara, N.; Kusaka, N. e Ida, S. “A Dual Polarization Microwave Power Transmission System for Microwave Propelled Airship Experiment,” in Proceedings of ISAP ’96, Chiba, Japan, pp. 393–396, 1996.
- [16] Schlesak, J. J.; Alden, A. e Ohno, T. “A Microwave Powered High Altitude Platform,” in Microwave Symposium Digest, 1998, IEEE MTT-S International, pp. 283–286, Maio de 1988.
- [17] Shinohara, N.; Nagano, K.; Ishii, T.; Kawasaki, S.; Fujiwara, T.; Nakayama, S.; Takahashi, Y.; Sasaki, S.; Tanaka, K.; Hisada, Y.; Fujino, T.; Mihara, S.; Anzai, T. e Kobayashi, Y. “Experiment of Microwave Power Transmission to the Moving Rover,” ISAP 2007, Niigata, Japão, pp. 648–651, 2007.
- [18] Brown, W. C. “Adaptive Microwave Techniques to Help Solve Future Energy Problems,” IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol. MTT-21, pp. 753–763, Dezembro 1973.
- [19] Dickinson, R. M. “Evaluation of a Microwave High-Power Reception-Conversion Array for Wire- less Power Transmission,” Technical Memorandum 33-741, National Aeronautics and Space Ad- ministration (NASA) Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology, Setembro 1975.
- [20] McSpadden, J. O.; Little, F. E.; Duke, M. B. e Ignatiev, A. “An In-Space Wireless Energy Transmission Experiment,” in Energy Conservation Engineering Conference, 1996. IECEC 96. Proceedings of the 31st Intersociety, pp. 468–473, Agosto 1996.
- [21] International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP), “Guidelines for Limiting Exposure to Time-Varying Electric, Magnetic, and Electromagnetic Fields (up to 300 GHz)”. Health Physics Society, 1998.
- [22] International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP), ICNIRP Statement on the “Guidelines for Limiting Exposure to Time-Varying Electric, Magnetic, and Electromagnetic Fields (up to 300 GHz)”. Health Physics Society, 2009.
- [23] IEEE International Committee on Electromagnetic Safety (SCC39), “IEEE Standard for Safety Levels with Respect to Human Exposure to Radio Frequency Electromagnetic Fields, 3 kHz to 300 GHz”. Std C95.1. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), April 2006.
- [24] Ulcek, J. L. e Cleveland, R. F.; “Evaluating Compliance with FCC Guidelines for Human Exposure to Radiofrequency Electromagnetic Fields”. Standards Development Branch, Alloca- tions and Standards Division, Office of Engineering and Technology, Federal Communications Commission (FCC), 1997.
- [25] McSpadden, J. O. e Mankins, J. C. “Space Solar Power Programs and Microwave

- Wireless Power Transmission Technology,” *Microwave Magazine*, IEEE, vol. 3, pp. 46–57, Dezembro 2002.
- [26] Matsumoto, H. “Research on Solar Power Satellites and Microwave Power Transmission in Japan,” *IEEE Microwave Magazine*, pp. 36–45, Dezembro 2002.
- [27] Covert, A. “Japan Wants to Power 300,000 homes with Wireless Energy from Space,” *Popular Science*, Setembro 2009.
- [28] DRAFT, “Supporting Document for the URSI White Paper on Solar Power Satellite Systems,” tech. rep., International Union of Radio Science (URSI) Inter-Commission Working Group on SPS, Novembro 2005.
- [29] Lin, J. C. “Health Effects: Space Solar-Power Stations, Wireless Power Transmissions, and Biological Implications,” *IEEE Microwave Magazine*, pp. 36–41, Março 2002.
- [30] Little, F. E. “Solar Power Satellites: Recent Developments,” tech. rep., Texas A&M University, Center for Space Power, 2002.
- [31] Haus, H. A. “Waves and Fields in Optoelectronics”, Ed. Prentice-Hall, 1984.
- [32] Balanis, C. A. “Antenna Theory-Analysis and Design”, Third Edition, pp. 231-281, 2005.
- [33] Occupational Safety and Health Administration, Cincinnati Technical Center (May 20, 1990). "Electromagnetic Radiation and How It Affects Your Instruments. Near field vs. Far field." U.S. Dept of Labor.
- [34] Grover, F.W. “Inductance Calculations”, Ed. Dover Publications, INC, 2009.
- [35] Babic, S. I.; Sirois, F. e Akyel, C. “Validity Check of Mutual Inductance Formulas for Circular Filaments with Lateral and Angular Misalignments,” *Progress In Electromagnetics Research*, vol. 8, pp. 15–26, 2009.
- [36] Shen, F. Z.; Cui, W. Z.; Ma, W.; Huangfu, J. T. e Ran, L. X. “Circuit analysis of wireless power transfer by coupled magnetic resonance,” in *Proc. IET Int. Commun. Conf. Wireless Mobile Computing (CCWMC 2009)*, pp. 602–605, Dezembro 2009.
- [37] Linlin, T.; Xueliang, H.; Hui, L. e Hui, H. “Study of wireless power transfer system through strongly coupled resonances,” in *Proc. 2010 Int. Conf. Electrical Control Eng. (ICECE)*, pp. 4275–4278, Junho 2010.
- [38] Choi, J.; Seo, C. “Analysis on Transmission Efficiency of Wireless Energy Transmission Resonator Based on Magnetic Resonance”, *Progress In Electromagnetics Research M*, Vol. 19, pp 221-237, 2011.

ANEXO I – CÓDIGO MATLAB[®] PARA CÁLCULO DA INDUTÂNCIA MÚTUA PELO MÉTODO DE GROVER [34]

```
function varargout = Babic_Grover(varargin)
% BABIC_GROVER MATLAB code for Babic_Grover.fig
%   BABIC_GROVER, by itself, creates a new BABIC_GROVER or raises the existing
%   singleton*.
%
%   H = BABIC_GROVER returns the handle to a new BABIC_GROVER or the handle to
%   the existing singleton*.
%
%   BABIC_GROVER('CALLBACK', hObject,eventData,handles,...) calls the local
%   function named CALLBACK in BABIC_GROVER.M with the given input arguments.
%
%   BABIC_GROVER('Property','Value',...) creates a new BABIC_GROVER or raises the
%   existing singleton*. Starting from the left, property value pairs are
%   applied to the GUI before Babic_Grover_OpeningFcn gets called. An
%   unrecognized property name or invalid value makes property application
%   stop. All inputs are passed to Babic_Grover_OpeningFcn via varargin.
%
%   *See GUI Options on GUIDE's Tools menu. Choose "GUI allows only one
%   instance to run (singleton)".
%
% See also: GUIDE, GUIDATA, GUIHANDLES
% Edit the above text to modify the response to help Babic_Grover
% Last Modified by GUIDE v2.5 21-Sep-2011 10:24:54
% Begin initialization code - DO NOT EDIT

gui_Singleton = 1;
gui_State = struct('gui_Name',    mfilename, ...
                  'gui_Singleton', gui_Singleton, ...
                  'gui_OpeningFcn', @Babic_Grover_OpeningFcn, ...
                  'gui_OutputFcn', @Babic_Grover_OutputFcn, ...
```

```

        'gui_LayoutFcn', [], ...
        'gui_Callback', []);
if nargin && ischar(varargin{1})
    gui_State.gui_Callback = str2func(varargin{1});
end
if nargin
    [varargout{1:nargout}] = gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
else
    gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
end
% End initialization code - DO NOT EDIT

% --- Executes just before Babic_Grover is made visible.
function Babic_Grover_OpeningFcn(hObject, eventdata, handles, varargin)
% This function has no output args, see OutputFcn.
% hObject    handle to figure
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
% varargin   command line arguments to Babic_Grover (see VARARGIN)

% Choose default command line output for Babic_Grover
handles.output = hObject;

% Update handles structure
guidata(hObject, handles);

% UIWAIT makes Babic_Grover wait for user response (see UIRESUME)
% uiwait(handles.figure1);

% --- Outputs from this function are returned to the command line.
function varargout = Babic_Grover_OutputFcn(hObject, eventdata, handles)
% varargout  cell array for returning output args (see VARARGOUT);
% hObject    handle to figure
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

```

```

% Get default command line output from handles structure
varargout{1} = handles.output;

% --- Executes on button press in bt_calcula.
function bt_calcula_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to bt_calcula (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)

Rp = get(handles.edit_Rp,'String');
Rs = get(handles.edit_Rs,'String');
x1 = get(handles.edit_x1,'String');
x2 = get(handles.edit_x2,'String');
theta = get(handles.edit_theta,'String');

Rp=str2num(Rp);
Rs=str2num(Rs);
x1=str2num(x1);
x2=str2num(x2);
theta=str2num(theta);

theta=theta*(pi/180);
h=x1-x2*cos(theta);
d=x2*sin(theta);
psi=0*(pi/180);

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Computation of mutual inductance (M) by Grover's formula (179)
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Conversion of above notation in Grover's notation
A=Rp; a=Rs; rho=d; d=h;

```

```

M_Grover=Grover_179(A,a,rho,d,theta,psi);

Rp=A; Rs=a;
xc=0; yc=rho; zc=d;
a=sin(psi)*sin(theta);
b=-cos(psi)*sin(theta);
c=cos(theta);

M_Babic=Babic_24(Rp,Rs,[xc yc zc],[a b c]);

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% For the sake of validating what we are computing, we draw the two
% circular loops...
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Preliminary computations
n_pts=701;
pc=[xc yc zc]; % Le centre de la boucle secondaire
r1=Rs*[-sin(psi)*cos(theta) ; cos(psi)*cos(theta) ; sin(theta)]; % Calculs faits sur une feuille en
faisant tourner le point Rs*[0 1 0] selon theta et psi
n=[a b c]; n=n/norm(n);
r2=cross(n,r1);
u=r2/norm(r2);
v=cross(n,u);
%figure(1)
%clf
%hold on
handles.axes1();
%clf
hold on
grid

for tt=0:2*pi/n_pts:2*pi*(1-1/n_pts),
    pp=Rp*[cos(tt) sin(tt) 0];

```

```

plot3(pp(1),pp(2),pp(3),'.b');
ps=pc+Rs*u*cos(tt)+Rs*v*sin(tt);
plot3(ps(1),ps(2),ps(3),'.g');
end
box on
set(gca,'DataAspectRatioMode','Manual');
line([0 2*Rp],[0 0],[0 0]);
line([0 0],[0 3*Rp],[0 0]);
line([0 0],[0 0],[0 2*Rp]);
xlabel('x'); ylabel('y'); zlabel('z');
%axis(Rp*[-2 2 -2 3 -1 2]);
view([1 0.7 0.7]);

%total = str2num(a) + str2num(b);
%c = num2str(total);
% need to convert the answer back into String type to display it
%set(handles.answer_staticText,'String',c);

M_Grover=num2str(M_Grover);
M_Babic=num2str(M_Babic);
set(handles.Text_M_Grover,'String',M_Grover);
set(handles.Text_M_Babic,'String',M_Babic);
guidata(hObject, handles);

function edit_Rp_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to edit_Rp (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit_Rp as text
% str2double(get(hObject,'String')) returns contents of edit_Rp as a double

%Grava o conteúdo do edit_Rp como String. Se a String
%n,,o È um n`mero ent,,o coloca 0.
input = str2num(get(hObject,'String'));

```

```

%Checa se a entrada entra vazia. Se estiver, define como 0.
if (isempty(input))
    set(hObject,'String','0')
end
guidata(hObject, handles);

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function edit_Rp_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to edit_Rp (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
% See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'), get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function edit_Rs_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to edit_Rs (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit_Rs as text
% str2double(get(hObject,'String')) returns contents of edit_Rs as a double

%Grava o conteudo do edit_Rs como String. Se a String
%n,,o È um n`mero ent,,o coloca 0.
input = str2num(get(hObject,'String'));

%Checa se a entrada entra vazia. Se estiver, define como 0.
if (isempty(input))
    set(hObject,'String','0')
end

```

```

guidata(hObject, handles);

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function edit_Rs_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to edit_Rs (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
% See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'), get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function edit_x1_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to edit_x1 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit_x1 as text
% str2double(get(hObject,'String')) returns contents of edit_x1 as a double

%Grava o conteúdo do edit_x1 como String. Se a String
%n,,o È um n`mero ent,,o coloca 0.
input = str2num(get(hObject,'String'));

%Checa se a entrada entra vazia. Se estiver, define como 0.
if (isempty(input))
    set(hObject,'String','0')
end
guidata(hObject, handles);

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function edit_x1_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to edit_x1 (see GCBO)

```

```

% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
% See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'), get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

```

```

function edit4_Callback(hObject, eventdata, handles)

```

```

% hObject handle to edit4 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit4 as text
% str2double(get(hObject,'String')) returns contents of edit4 as a double

```

```

% --- Executes during object creation, after setting all properties.

```

```

function edit4_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

```

```

% hObject handle to edit4 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles empty - handles not created until after all CreateFcns called

```

```

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.

```

```

% See ISPC and COMPUTER.

```

```

if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'), get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

```

```

function edit5_Callback(hObject, eventdata, handles)

```

```

% hObject handle to edit5 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)

```

```

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit5 as text

```

```

%   str2double(get(hObject,'String')) returns contents of edit5 as a double

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function edit5_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject   handle to edit5 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles   empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%   See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'), get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function edit6_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject   handle to edit6 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles   structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit6 as text
%   str2double(get(hObject,'String')) returns contents of edit6 as a double

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function edit6_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject   handle to edit6 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles   empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%   See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'), get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function edit7_Callback(hObject, eventdata, handles)

```

```

% hObject  handle to edit7 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles  structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit7 as text
%    str2double(get(hObject,'String')) returns contents of edit7 as a double

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function edit7_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject  handle to edit7 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles  empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%    See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'), get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function edit8_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject  handle to edit8 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles  structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit8 as text
%    str2double(get(hObject,'String')) returns contents of edit8 as a double

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function edit8_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject  handle to edit8 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles  empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.

```

```

% See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'), get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

% --- Executes on selection change in popupmenu1.
function popupmenu1_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to popupmenu1 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: contents = cellstr(get(hObject,'String')) returns popupmenu1 contents as cell array
% contents{get(hObject,'Value')} returns selected item from popupmenu1

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function popupmenu1_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to popupmenu1 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: popupmenu controls usually have a white background on Windows.
% See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'), get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

% -----
function Untitled_1_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to Untitled_1 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)

function edit_x2_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to edit_x2 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB

```

```

% handles  structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit_x2 as text
%      str2double(get(hObject,'String')) returns contents of edit_x2 as a double

%Grava o conteudo do edit_x2 como String. Se a String
%n,,o È um n`mero ent,,o coloca 0.
input = str2num(get(hObject,'String'));

%Checa se a entrada entra vazia. Se estiver, define como 0.
if (isempty(input))
    set(hObject,'String','0')
end
guidata(hObject, handles);

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function edit_x2_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject  handle to edit_x2 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles  empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%      See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'), get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function edit_theta_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject  handle to edit_theta (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles  structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit_theta as text
%      str2double(get(hObject,'String')) returns contents of edit_theta as a double

```

```

%Grava o conteúdo do edit_theta como String. Se a String
%n,o È um n`mero ent,o coloca 0.
input = str2num(get(hObject,'String'));

%Checa se a entrada entra vazia. Se estiver, define como 0.
if (isempty(input))
    set(hObject,'String','0')
end
guidata(hObject, handles);

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function edit_theta_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject   handle to edit_theta (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles   empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%   See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'), get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function edit11_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject   handle to edit11 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles   structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit11 as text
%   str2double(get(hObject,'String')) returns contents of edit11 as a double

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function edit11_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject   handle to edit11 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles   empty - handles not created until after all CreateFcns called

```

```
% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
% See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'), get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end
```

```
% --- Executes during object creation, after setting all properties.
```

```
function axes1_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
```

```
% hObject handle to axes1 (see GCBO)
```

```
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
```

```
% handles empty - handles not created until after all CreateFcns called
```

```
% Hint: place code in OpeningFcn to populate axes1
```

```
% --- Executes during object creation, after setting all properties.
```

```
function axes2_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
```

```
% hObject handle to axes1 (see GCBO)
```

```
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
```

```
% handles empty - handles not created until after all CreateFcns called
```

```
% Hint: place code in OpeningFcn to populate axes1
```

ANEXO II – CÓDIGO MATLAB® PARA INTERPOLAÇÃO DA EFICIÊNCIA NA TRANSMISSÃO DE ENERGIA SEM FIOS

```

%Programa para Interpolar o Valor da Eficiencia (n)
%Baseado nas equacao do Heebl

clear all;
clc;
nm=0; %Melhor Eficiencia
n=0; %Eficiencia

for w=5e6:(30e6-5e6)/100:30e6 %Variacao da frequencia de 60
Hz a 10 MHz, calculo de 10 pontos.
    for RL=100:(1e6-100)/100:1e6 %Variacao da Resistencia de
carga de 100 Ohms a 1 MOhm, calculo de 10 pontos.
        for R12=10:(100-10)/100:100 %Variacao da Resistencia de perda
do Emissor e Receptor de 0.1 Ohm a 100 Ohms, calculo de 10 pontos.
            for M12=1e-9:(1e-6-1e-9)/100:1e-6 %Variacao da Indutancia Mutua de
1nH a 1uH, calculo de 10 pontos.

                n= ((w*M12)^2)*RL/(R12*((R12+RL)^2)+((w*M12)^2)*(R12+RL));

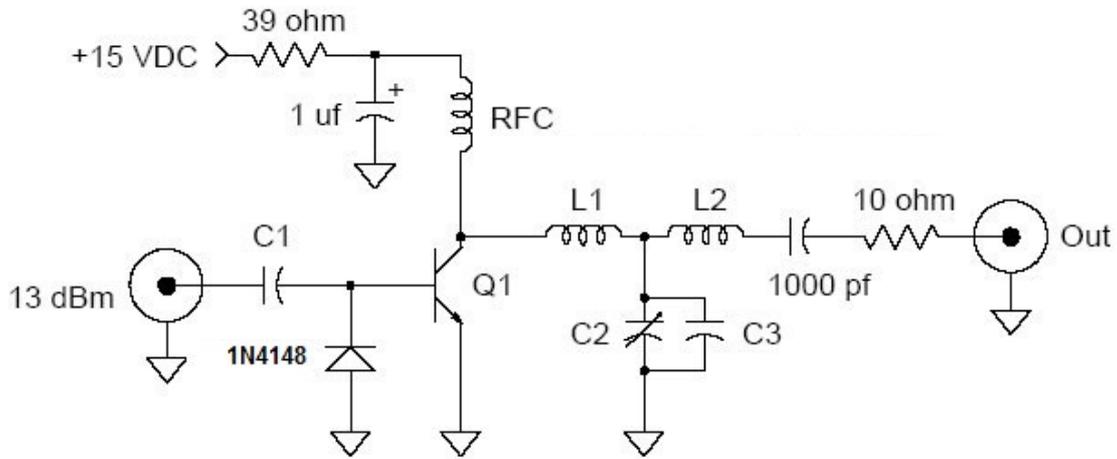
                if n>nm %Se a Eficiencia calculada for
Maior que a Melhor Eficiencia calculada ate o momento, Armazenar Valores
                    nm=n;
                    wm=w;
                    RLm=RL;
                    R12m=R12;
                    M12m=M12;

                end
            end
        end
    end
end

nm %A Melhor Eficiencia é...
wm %A Melhor Frequencia é...
RLm %A Melhor Resistencia de Carga
é...
R12m %A Melhor Resistencia de Perdas
é...
M12m %A Melhor Indutancia Mutua é..

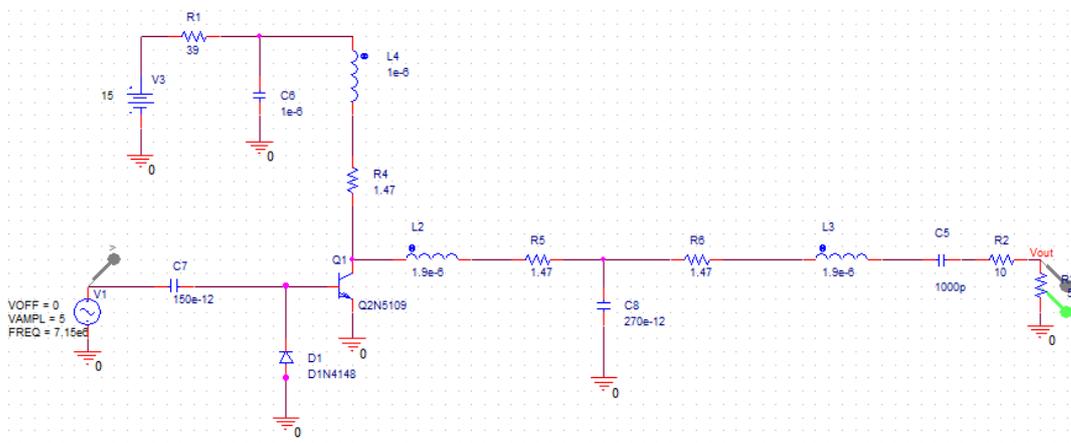
```

ANEXO III – DESIGN AMPLIFICADOR DE RF DE 1W

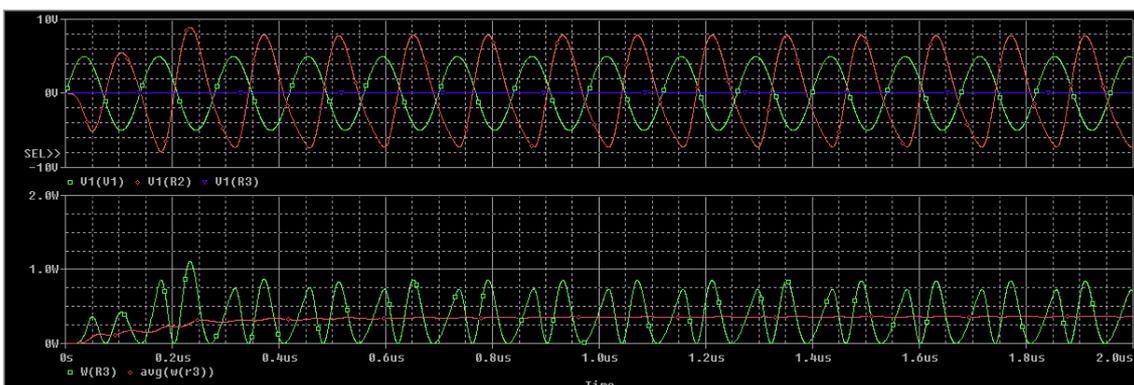


Frequência	P saída	C1	C2	C3	L1	L2	RFC	Q1
7 MHz	>0,5W	150 pF	270pF	-	1,9uH	1,9uH	1uH	2N5109

Esquema Elétrico Simulado:



Potência e Tensões Simuladas:



ANEXO IV – PUBLICAÇÕES

O presente trabalho teve como resultado as publicações listadas abaixo:

- **Título:** “Análise dos Parâmetros Físicos no Projeto de Bobinas para Transmissão de Energia Sem Fios”

Evento: MOMAG 2012: 15º SBMO - Simpósio Brasileiro de Micro-ondas e Optoeletrônica e 10º CBMag – Congresso Brasileiro de Eletromagnetismo

Local: 5 a 8 de Agosto de 2012 – João Pessoa – PB

Modalidade: Apresentação em Pôster.

- **Título:** “Investigação Numérica da Eficiência na Transmissão de Energia Sem Fios”

Evento: CBA 2012: XIX Congresso Brasileiro de Automática

Data: 2 a 6 de Setembro de 2012 – Campina Grande - PB

Modalidade: Apresentação Oral.