



**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO
CEARÁ**

**PRÓ-REITORIA DE ENSINO
COORDENAÇÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE
TELECOMUNICAÇÕES-PPGET**

JOSÉ HELDER DE AGUIAR CÂMARA

**ESTUDO E CARACTERIZAÇÃO DO ACOPLAMENTO MAGNÉTICO
FORTE ENTRE RESSOADORES ELÉTRICOS EM RF**

**FORTALEZA
2016**

JOSÉ HELDER DE AGUIAR CÂMARA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Telecomunicações do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará, como requisito parcial a obtenção do Título de Mestre em Engenharia de Telecomunicações.

Área de concentração: Sistemas de Telecomunicações.

Aprovada em: 12/05/2016

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Daniel Xavier Gouveia (Orientador)

IFCE

Prof. Dr. Antonio Sérgio Bezerra Sombra (Co-orientador)

UFC

Prof. Dr. Francisco José Alves de Aquino

IFCE

Prof. Dr. Juan Carlos Alvarado Alcócer

UNILAB

FORTALEZA

2016

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação

Instituto Federal do Ceará - IFCE

Sistema de Bibliotecas - SIBI

Ficha catalográfica elaborada pelo SIBI/IFCE, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

C172e Câmara, José Hélder de Aguiar.

Estudo e caracterização do acoplamento magnético forte entre ressoadores elétricos em RF / José Hélder de Aguiar Câmara. - 2016.
91 f. : il. color.

Dissertação (Mestrado) - Instituto Federal do Ceará, Mestrado em Engenharia de Telecomunicações, Campus Fortaleza, 2016.

Orientação: Prof. Dr. Daniel Xavier Gouveia.

Coorientação: Prof. Dr. Antonio Sérgio Bezerra Sombra.

1. Acoplamento magnético forte. 2. Witricity. 3. Circuito RLC em ressonância. 4. Frequência. I. Título.

CDD 621.382

Agradecimentos

Agradeço a Deus, pela minha saúde, por que sem ela não seria possível atingir este objetivo.

Agradeço ao Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia pela oportunidade que me foi dada para a realização desse Mestrado. Aos professores do PPGET, em especial ao meu orientador e coordenador do programa, professor Daniel Xavier Gouveia, que com dedicação e paciência foi de fundamental importância na conclusão desse trabalho.

Ao meu filho Rafael, meu grande incentivador, (Analista de Sistemas de Computação), e ao estagiário e estudante de Engenharia de telecomunicações Victor, que prestaram suas colaborações na formatação do texto.

Agradeço também a Secretaria de Educação do Estado do Ceará-SEDUC, pela liberação de minhas obrigações como professor de ensino médio, para que eu pudesse assistir às aulas;

Obrigado.

RESUMO

Este trabalho apresenta um estudo experimental sobre transmissão de energia sem fio através do acoplamento magnético forte. Foram utilizados no estudo quatro tipos de bobinas formando um circuito RLC em ressonância, com diferentes diâmetros, que também diferem entre si pelos diâmetros dos fios e valores de capacitores. Para melhorar o acoplamento e termos uma melhor indutância, distâncias pequenas entre o transmissor e o receptor foram adotadas. Foram testadas e alinhadas todas as bobinas em frequência. Vários parâmetros de interesse foram analisados, tais como: eficiência, tensões de circuito aberto e na carga do receptor, campo magnético em função da distância e do ângulo, e a impedância em função da frequência. Todos os conjuntos foram testados para as três configurações (linear, lateral e angular) as quais nos propúnhamos observar as variações dos parâmetros. Os resultados apresentados, tanto o teórico quanto o experimental, ficaram próximos da linha metodológica seguida. Por ser uma tecnologia emergente, a transmissão de energia sem fios ("*Witricity*"), desperta atualmente grande interesse por ter aplicações diversas, como: carregamento de baterias de celulares, de veículos automotores, aplicação na área médica e construção civil.

Palavras-chave - Acoplamento magnético forte; Witricity, circuito RLC em ressonância, frequência.

ABSTRACT

This work presents an experimental study on wireless power transmission through the strong magnetic coupling. Were used in this study four types of coils forming a resonant RLC circuit with different diameters, which also differ in the diameters of the wires and capacitor values. To improve the coupling and have a better inductance, short distances between the transmitter and the receiver were adopted. They were tested and all coils in line frequency. Various parameters of interest were analyzed, such as: efficiency, open-circuit voltages and the receptor charge, magnetic field as a function of distance and angle, and the impedance versus frequency. All sets were tested for the three configurations (linear, lateral and angular) which we proposed to observe the variations of the parameters. The results presented, both theoretical and experimental, were close to the methodological approach followed. Being an emerging technology, the wireless power transmission ("Witricity"), awakens currently great interest to have several applications, such as charging mobile batteries, motor vehicles, application in medical and construction.

Keywords – (strong magnetic coupling; Witricity, RLC circuit at resonance frequency).

SUMÁRIO

Agradecimentos	3
RESUMO	4
ABSTRACT	5
Lista de Figuras	8
Lista de tabelas	11
Lista de símbolos	13
Lista de abreviações	16
CAPÍTULO 1	17
INTRODUÇÃO	17
FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	25
1. 2.1 Equações de Maxwell	25
2.2- Ondas eletromagnéticas.....	27
2.3 – O circuito série RLC	28
2.4-Circuitos acoplados	30
2.5. Conceitos sobre antenas	33
2.5.1 –Tipos de antenas	34
2.5.2. Regiões de campo de uma antena	38
2.6.Conclusões do capítulo	40
CAPÍTULO 3	41
MATERIAIS E MÉTODOS	41
3.1 Materiais	41
3.2 – Alinhamento em frequência e medição de f_0	42
3.3 Métodos	43
3.4 Medições	46
3.5 Equipamentos Utilizados	47
3.6 Conclusões do capítulo.....	47
CAPÍTULO 4	48
RESULTADOS EXPERIMENTAIS	48
4.1- Introdução	48
4.2 Resistências de perda e resistências de radiação	49
4.3 Valores do Fator de Qualidade Q, indutância mutua M e auto-indutância L dos ressoadores	51
4.4 – Valores calculados de eficiência	52

4.6 – Gráficos – Impedâncias x frequências	57
4.8 Indutâncias Mútuas	63
4.9 Valores experimentais e calculados das tensões	65
4.10 – Medidas das tensões	67
4.11 Discussões dos resultados	75
CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS	76
Referências bibliográficas	77

Lista de Figuras

Figura 1	Experimento em um porco York Shire.....	Pg.21
Figura 2	Sistema de transmissão de energia por acoplamento magnético ar-concreto	Pg.21
Figura 3	Sistema por acoplamento magnético incluindo caixa de ar	Pg.22
Figura 4	Conceito de transferência de energia sem contato.....	Pg.22
Figura 5	Ressonância RLC e sua resposta.....	Pg.29
Figura 6	Circuito RLC fechado	Pg.30
Figura 7	Circuito RLC aberto	Pg.31
Figura 8	Antena no modo transmissor	Pg.35
Figura 9	Antena no modo receptor	Pg.35
Figura 10	Circuito equivalente da antena modo transmissão.....	Pg.35
Figura 11	Circuito equivalente da antena no modo receptor.....	Pg.36
Figura 12	Antena Padrão.....	Pg.38
Figura 13	Regiões de campo de uma antena.....	Pg.39
Figura 14	Modelo de bobina utilizado nos experimentos	Pg.42
Figura 15	Conjunto de bobinas utilizados na coleta de dados	Pg.44
Figura 16	Afastamento linear e equipamentos	Pg.45
Figura 17	Deslocamento lateral	Pg.45
Figura 18	Desalinhamento angular	Pg.46
Figura 19	Medição de tensão em circuito fechado	Pg.46
Figura 20	Medição de tensão em circuito aberto	Pg.46
Figura 21	Gráfico Z_x Frequências Grupo A	Pg.58
Figura 22	Gráfico Z x Frequências Grupo A	Pg.58
Figura 23	Gráfico Z x Frequências Grupo A	Pg.58
Figura 24	Gráfico Z x Frequências Grupo B	Pg.59
Figura 25	Gráfico Z x Frequências Grupo B	Pg.64
Figura 26	Gráfico Z x Frequências Grupo C.....	Pg.60
Figura 27	Gráfico Z x Frequências Grupo C.....	Pg.60

Figura 28	Gráfico Z x Frequências Grupo D.....	Pg.61
Figura 29	Gráfico Z x Frequências Grupo D.....	Pg.61
Figura 30	Valores Teóricos de B Grupo A	Pg.62
Figura 31	Valores teóricos de B Grupo B	Pg.62
Figura 32	Valores teóricos B Grupo C	Pg.62
Figura 33	Valores teóricos de B Grupo D	Pg.63
Figura 34	Gráfico indutância mútua x distância Grupo A	Pg.63
Figura 35	Gráfico indutância mútua x distância Grupo B	Pg.64
Figura 36	Gráfico indutância mútua x distância Grupo C	Pg.64
Figura 37	Gráfico indutância mútua x distância Grupo D	Pg.65
Figura 38	Gráfico valores experimentais e calculados da tensão x Distância Grupo A	Pg.65
Figura 39	Gráfico valores experimentais e calculados da tensão x Distância Grupo B	Pg.66
Figura 40	Gráfico valores experimentais e calculados da tensão x Distância Grupo C	Pg.66
Figura 41	Gráfico valores experimentais e calculados da tensão x Distância Grupo D	Pg.67
Figura 42	Tensão de circuito aberto x distância Grupo A linear	Pg.68
Figura 43	Tensão de circuito aberto x distância Grupo A lateral	Pg.68
Figura 44	Tensão de circuito aberto x distância Grupo A angular ...	Pg.68
Figura 45	Tensão de circuito aberto x distância Grupo B linear	Pg.69
Figura 46	Tensão de circuito aberto x distância Grupo B lateral	Pg.69
Figura 47	Tensão de circuito aberto x distância Grupo B angular ...	Pg.69
Figura 48	Tensão de circuito aberto x distância Grupo C lateral	Pg.70
Figura 49	Tensão de circuito aberto x distância Grupo C angular ...	Pg.70
Figura 50	Tensão de circuito aberto x distância Grupo D linear	Pg.70
Figura 51	Tensão de circuito aberto x distância Grupo lateral	Pg.71
Figura 52	Tensão de circuito aberto x distância Grupo D angular.....	Pg.71
Figura 53	Tensão de circuito aberto x distância Grupo A linear	Pg.71
Figura 54	Tensão na carga x distância Grupo A lateral	Pg.72
Figura 55	Tensão na carga x distância Grupo A angular	Pg.72
Figura 56	Tensão na carga x distância Grupo B lateral	Pg.72

Figura 57 Tensão na carga x distância Grupo C linear	Pg.73
Figura 58 Tensão na carga x distância Grupo C lateral	Pg.73
Figura 59 Tensão na carga x distância Grupo C angular	Pg.73
Figura 60 Tensão na carga x distância Grupo D linear	Pg.74
Figura 61 Tensão na carga x distância Grupo D lateral	Pg.74
Figura 62 Tensão na carga x distância Grupo D angular	Pg.74

Lista de tabelas

Tabela 1 Características dimensionais dos grupos de bobinas...	Pg.41
Tabela 2 Capacitores e frequências ressonantes	Pg.43
Tabela 3 Valores dos afastamentos entre os conjuntos T_{RX} e R_X	Pg.44
Tabela 4 Comprimento de onda x frequência.....	Pg.48
Tabela 5 Comprimento de onda x frequência.....	Pg.48
Tabela 6 Comprimento de onda x frequência.....	Pg.49
Tabela 7 Comprimento de onda x frequência.....	Pg.49
Tabela 8 Resistências de perdas e radiação	Pg.50
Tabela 9 Resistências de perdas e radiação	Pg.50
Tabela 10 Resistências de perdas e radiação.....	Pg.50
Tabela 11 Resistências de perdas e radiação.....	Pg.50
Tabela 12 Parâmetros Q , M e L do circuito RLC	Pg.52
Tabela 13 Valores das eficiências em por cento	Pg.53
Tabela 14 Valores das eficiências em por cento	Pg.53
Tabela 15 Valores das eficiências em por cento	Pg.53
Tabela 16 Valores das eficiências em por cento	Pg.54
Tabela 17 Valores das eficiências em por cento	Pg.54
Tabela 18 Valores das eficiências em por cento	Pg.54
Tabela 19 Valores das eficiências em por cento	Pg.55
Tabela 20 Valores das eficiências em por cento	Pg.55
Tabela 21 Valores das eficiências em por cento	Pg.55
Tabela 22 Valores das eficiências em por cento	Pg.56
Tabela 23 Valores das eficiências em por cento	Pg.56
Tabela 24 Valores das eficiências em por cento.....	Pg.56
Tabela 25 Valores teóricos e experimentais das impedâncias.....	Pg.57
Tabela 26 Medidas de VCO e Vcarga Grupo A linear	Pg.80
Tabela 27 Medidas de VCO e Vcarga Grupo A linear	Pg.80
Tabela 28 Medidas de VCO e Vcarga Grupo A linear	Pg.80
Tabela 29 Medidas de VCO e Vcarga Grupo A lateral	Pg.81

Tabela 30 Medidas de VCO e Vcarga Grupo A lateral	Pg.81
Tabela 31 Medidas de VCO e Vcarga Grupo A lateral.....	Pg.81
Tabela 32 Medidas de VCO e Vcarga Grupo A angular	Pg.82
Tabela 33 Medidas de VCO e Vcarga Grupo A angular	Pg.82
Tabela 34 Medidas de VCO e Vcarga Grupo A angular	Pg.82
Tabela 35 Medidas de VCO e Vcarga Grupo B linear	Pg.83
Tabela 36 Medidas de VCO e Vcarga Grupo B linear	Pg.83
Tabela 37 Medidas de VCO e Vcarga Grupo B linear	Pg.83
Tabela 38 Medidas de VCO e Vcarga Grupo B lateral	Pg.84
Tabela 39 Medidas de VCO e Vcarga Grupo B lateral	Pg.84
Tabela 40 Medidas de VCO e Vcarga Grupo B lateral	Pg.84
Tabela 41 Medidas de VCO e Vcarga Grupo B angular	Pg.85
Tabela 42 Medidas de VCO e Vcarga Grupo B angular.....	Pg.85
Tabela 43 Medidas de VCO e Vcarga Grupo B angular	Pg.85
Tabela 44 Medidas de VCO e Vcarga Grupo C linear	Pg.86
Tabela 45 Medidas de VCO e Vcarga Grupo C linear	Pg.86
Tabela 46 Medidas de VCO e Vcarga Grupo C linear	Pg.86
Tabela 47 Medidas de VCO e Vcarga Grupo C lateral	Pg.87
Tabela 48 Medidas de VCO e Vcarga Grupo C lateral	Pg.87
Tabela 49 Medidas de VCO e Vcarga Grupo C lateral	Pg.87
Tabela 50 Medidas de VCO e Vcarga Grupo C angular	Pg.88
Tabela 51 Medidas de VCO e Vcarga Grupo C angular	Pg.88
Tabela 52 Medidas de VCO e Vcarga Grupo C angular	Pg.88
Tabela 53 Medidas de VCO e Vcarga Grupo D linear	Pg.89
Tabela 54 Medidas de VCO e Vcarga Grupo D linear	Pg.89
Tabela 55 Medidas de VCO e Vcarga Grupo D linear	Pg.89
Tabela 56 Medidas de VCO e Vcarga Grupo D lateral	Pg.90
Tabela 57 Medidas de VCO e Vcarga Grupo D lateral	Pg.90
Tabela 58 Medidas de VCO e Vcarga Grupo D lateral	Pg.90
Tabela 59 Medidas de VCO e Vcarga Grupo D angular	Pg.91
Tabela 60 Medidas de VCO e Vcarga Grupo D angular.....	Pg.91
Tabela 61 Medidas de VCO e Vcarga Grupo D angular.....	Pg.91

Lista de símbolos

H	Altura entre transmissor e receptor	Pg.21
ℓ_1	Distância entre a fonte e o transmissor	Pg.21
ℓ_3	Distância entre o receptor e a carga	Pg.21
D	Distância entre o transmissor e o receptor	Pg.21
L₁	Fonte	Pg.21
L₂	Transmissor	Pg.25
E	Campo elétrico	Pg.25
B	Campo magnético	Pg.25
	Divergente	Pg.25
	Permeabilidade do espaço livre	Pg.25
D	Densidade de fluxo	Pg.27
J	Densidade de corrente	Pg.27
	Laplaciano de E	Pg.27
	Laplaciano de H	Pg.27
	Permissividade do material	Pg.28
S	Vetor de Poynting	Pg.28
W₀	Frequência de ressonância em radianos	Pg.28
L	Auto-indutância	Pg.28
C	Capacitância	Pg.28
Q	Fator de qualidade	Pg.29
X_L	Reatância indutiva	Pg.29
X_C	Reatância capacitiva	Pg.29
Z	Impedância	Pg.29
R	Resistor de carga	Pg.30
I₂	Corrente no receptor	Pg.30
M	Indutância mútua	Pg.30
a	Raio da bobina A	Pg.32
b	Raio da bobina B	Pg.32

z	Distância entre as bobinas.....	Pg.32
	Rotacional de A	Pg.32
m	Momento magnético.....	Pg.33
β	Coeficiente geométrico da indutância.....	Pg.33
I	Corrente elétrica.....	Pg.33
a	Área da bobina	Pg.33
Z_A	Impedância de entrada	Pg.34
R_A	Resistência	Pg.34
X_A	Reatância indutiva externa	Pg.34
R_r	Resistência de perdas	Pg.34
R_{RAD}	Resistência de radiação	Pg.36
Z_{in}	Impedância de entrada	Pg.36
R_{in}	Resistência	Pg.36
X_{in}	Reatância indutiva interna	Pg.36
L_A	Indutância externa	Pg.36
L_i	Indutância interna	Pg.36
a	Raio da bobina	Pg.36
b	Diâmetro do fio da bobina	Pg.36
R_{thf}	Resistência de alta frequência	Pg.36
C	Comprimento	Pg.37
W	Frequência angular em radianos	Pg.37
	Condutividade no espaço livre	Pg.37
G_a	Ganho	Pg.37
P_1	Potência de entrada da antena	Pg.37
P_2	Potência de saída da antena	Pg.37
P_{ave}	Potência média	Pg.37
P_{Rad}	Potência média radiada	Pg.37
$d\Omega$	Unidade elementar de ângulo em esferoradiano	Pg.38
D	Diretividade	Pg.38
U_{max}	Intensidade de radiação máxima	Pg.38
U_{ave}	Intensidade de radiação média	Pg.38
G_P	Ganho de potência	Pg.38
D	Dimensão maior	Pg.39

L	Largura da bobina	Pg.39
Φ_{bobina}	Diâmetro da bobina	Pg.41
Φ_{FIO}	Diâmetro do fio da bobina	Pg.41
C_1	Capacitor 1.....	Pg.43
C_2	Capacitor 2.....	Pg.43
C_3	Capacitor 3	Pg.43
λ	Comprimento de onda	Pg.48
C	Comprimento	Pg.48
	Letra Pi (3,1416...)	Pg.48
	Frequência	Pg.48
	Profundidade de penetração	Pg.51
	Resistência de radiação	Pg.51
	Resistência de perdas	Pg.51
a	Raio da bobina	Pg.51
N	Número de espiras	Pg.51
Q	Fator de qualidade	Pg.52
R_1 e R_2	Resistências de carga	Pg.52
E%	Eficiência	Pg.52
VAC	Voltagem de corrente alternada	Pg.67

Lista de abreviações

RLC	Resistor, indutor e capacitor	Pg.30
FEM	Força Eletromotriz	Pg.30
T _{RX}	Transmissor	Pg.31
R _X	Receptor	Pg.31
IEEE	Instituto Internacional de Engos Eletricistas e Eletrônicos	Pg.34
VOC	Tensão de circuito aberto	Pg.43
V _{CARGA}	Tensão na carga	Pg.43
P _{TRX}	Potência no transmissor	Pg.52
P _{RX}	Potência no receptor	Pg.52
VAC	Voltagem de corrente alternada	Pg.67

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 Histórico

Em 1820, o físico dinamarquês H. C. Oersted (1777-1825) observou que ao passar uma corrente por um fio condutor, uma agulha magnética próxima sofria sua influência, mudando sua posição. Percebeu que ao se passar uma corrente elétrica por um fio, um campo magnético é gerado ao seu redor.

Em 1899, Nikola Tesla em suas pesquisas sobre eletromagnetismo aplicado buscou realizar a transferência de energia elétrica à grande distância. Também foi provado por outros cientistas em diferentes experimentos que a transferência de sinais elétricos de alta frequência através de grandes distâncias era possível [1].

A última década testemunhou um aumento no uso de dispositivos eletrônicos autônomos (laptops, telefones celulares, robôs, PDAs, etc.). Como consequência, o interesse em energia sem fio ressurgiu. Um recente trabalho teórico apresentou uma análise detalhada e a viabilidade da utilização de objetos ressonantes acoplados através dos seus campos próximos para a transferência de energia [1].

Intuitivamente, dois objetos ressonantes na mesma frequência de ressonância tendem a trocar energia com eficiência, enquanto dissipa relativamente pouca energia com objetos não ressonantes. Nos sistemas acoplados de ressonâncias (por exemplo, acústico, eletromagnéticos, magnéticos, nuclear), muitas vezes há um regime de operação geralmente “fortemente acoplado”. Se podemos operar neste regime a transferência de energia espera-se que seja, eficiente [1-2].

Deste modo, vemos que a transmissão de energia sem fios (“*wireless Power transfer energy*”) é um tema já abordado no final do século XIX e início do século XX devendo-se esta idéia ser atribuída a Tesla. O acoplamento indutivo é um método tradicional de transferência de energia. A fonte alimenta uma bobina primária (transmissor), criando um campo magnético

senoidal, o que induz uma tensão nos terminais de uma bobina secundária (receptor) e transferindo energia.

Este mecanismo é responsável pela transferência de energia em um transformador, em que o campo magnético é confinado a um núcleo de material ferromagnético de alta permeabilidade, também funciona quando a região entre o primário e as bobinas secundárias são simplesmente o ar. Um estudo comparativo entre o método tradicional de acoplamento magnético e o acoplamento magnético forte, mostrou que a tensão de saída no receptor apresentava valores crescentes a medida que reduzia-se a distância entre o transmissor e o receptor, o mesmo acontecendo para a potência aparente do sistema em relação à distância [1-4].

Em 2007 foi proposta uma nova abordagem sobre o tema [KURS et al] baseada na Teoria dos Modos Acoplados (*"Coupled modes theory"*). Em seu trabalho KURS et al propõem um esquema experimental capaz de energizar uma lâmpada a uma distância de 0,5 m através do espaço livre. Esta proposição se baseia em um princípio que pode intuitivamente ser compreendido da seguinte maneira: um sistema funcionando em sua frequência de ressonância pode transmitir energia para um segundo sistema na sua proximidade, desde que o segundo sistema tenha a mesma frequência de ressonância [1].

A partir daí ocorreu um grande interesse sobre este método visto que devido ao crescimento de dispositivos portáteis recarregáveis no mercado de equipamentos eletrônicos abria-se uma nova perspectiva para a tecnologia do carregamento de equipamentos sem utilização de fios.

Dada as perspectivas de aplicação, observa-se um grande interesse nos sistemas que utilizam acoplamento magnético forte. O acoplamento magnético ressonante forte entre dois sistemas ocorre quando um sistema (transmissor) é excitado com um sinal cuja frequência é igual a de ressonância do mesmo, e o outro sistema (receptor) absorve a energia do primeiro. Deste modo é possível a transmissão de energia pelo espaço livre. Este é o cerne da estratégia de acoplamento magnético forte [1].

Em estudo realizado em protótipo ressonador para algumas aplicações especiais, como bombas cardíacas e dispositivos de alívio para dor, alguns requisitos rigorosos foram aplicados sobre o tamanho dos dispositivos [7-9].

Foi possível projetar uma bobina espiral planar com uma frequência de ressonância especificada, alterando alguns parâmetros da bobina como: número de espiras, diâmetro do fio, e o diâmetro interno da bobina). No ressonador em foco, foi observado que ao aumentar todos esses parâmetros, a frequência diminuía.

A partir dos resultados de simulações que foram feitas, foi observado que a frequência de ressonância do ressonador é sensível a parâmetros dimensionais das bobinas. Portanto, pode-se projetar um ressonador de acordo com as exigências do projeto havendo portanto margens de flexibilidade para o projetista.

A eficiência da transmissão varia com o aumento da distância entre as bobinas. O alinhamento angular entre as bobinas acopladas, também influi na eficiência. (O conhecimento qualitativo da influência destes dois fatores, distância entre bobinas e alinhamento angular) para um dado projeto é de grande importância.

É fato conhecido que o desalinhamento lateral e angular, tem influência na eficiência de transmissão dos sistemas sem fio [12-15].

Em estudo realizado, foi observada essa influência, através da tensão de saída no receptor em função do desalinhamento angular e lateral entre as bobinas transmissora e receptora, como também da tensão de saída em função da distância entre as bobinas [12-15]. Essa parte analítica é feita por simulação através de *softwares* e métodos específicos. A simulação, utilizando o método dos elementos finitos obtém a tensão de saída versus frequência mantendo uma distância fixa (cinco cm) e fazendo variar a frequência, o desalinhamento lateral ou angular; Faz o cálculo para a tensão de saída, fazendo variar a distância entre as bobinas (incrementos de 2 em 2cm). Em ambos os casos observou-se uma queda na tensão de saída do receptor quando se aumentava o desalinhamento lateral ou angular e/ou a distância entre as bobinas. Uma maneira de melhorar a eficiência da transmissão, é usar ressonadores retransmissores entre a bobina

transmissora e a receptora; ou seja, se colocarmos uma bobina entre o transmissor e o receptor teremos uma tensão na saída melhor no receptor [16].

1.2. Áreas de aplicação

1.2.1 Biomedicina

Uma área de grande aplicação desta tecnologia é a biomedicina. Nesta área (equipamentos biomédicos) muitas vezes a troca de bateria implica em uma cirurgia.

Na Figura 1 temos um exemplo de aplicação de um experimento que foi realizado pela implantação *in vivo* em um porco York Shire (20 kg) na Universidade de Pittsburgh. O ressonador foi colocado dentro de um saco plástico e implantado dentro do abdomen cerca de 35 mm sob a pele, transmitindo energia ao receptor com sucesso a uma distância de 100mm, como evidenciado pela iluminação de um LED. Se o LED for substituído por um circuito retificador regulador, a energia produzida pode ser armazenada ou utilizada diretamente para operar um dispositivo médico implantado no corpo como : marca passos, bombas de infusão controlada de medicamentos , implantes cocleares, neuro estimuladores, monitores internos de pressão , desfibriladores cardíacos, etc . Como são possíveis de implantação no corpo humano e necessitam de cirurgia para a troca de sua fonte de energia (bateria), a tecnologia de transferência de energia sem fio (*wireless*) pode representar um avanço significativo nessa área, através da realização de recarga sem necessidade de cirurgia específica para a troca da bateria [5-7].

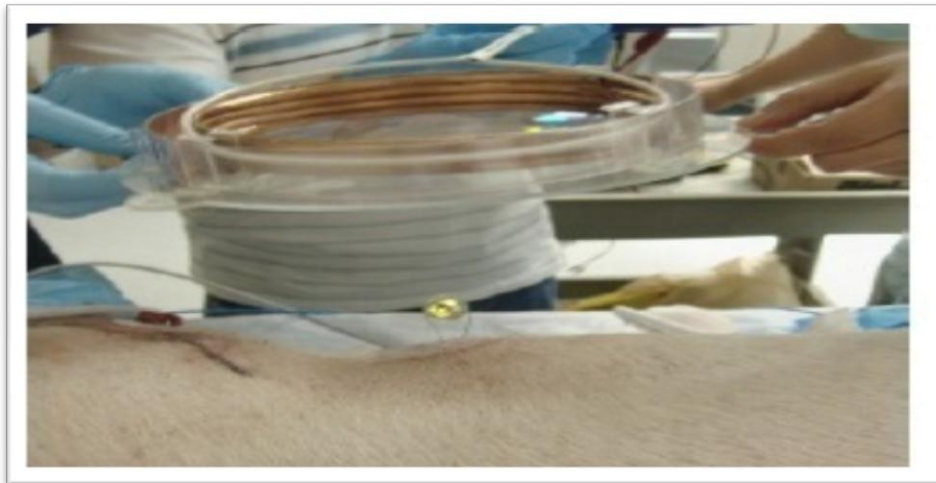


Figura1– Experimento em um porco *York Shire* na Universidade de Pittsburgh [5-7].

1.2.2-Construção civil

Tem aplicação também na construção civil, para monitoramento de estruturas através de sensores, permite a identificação de problemas estruturais e fornece alerta em tempo hábil para possíveis intervenções ou reparos.

Um estudo realizado para aplicação ar-concreto é mostrado pelas figuras 2 e 3 [8-9].

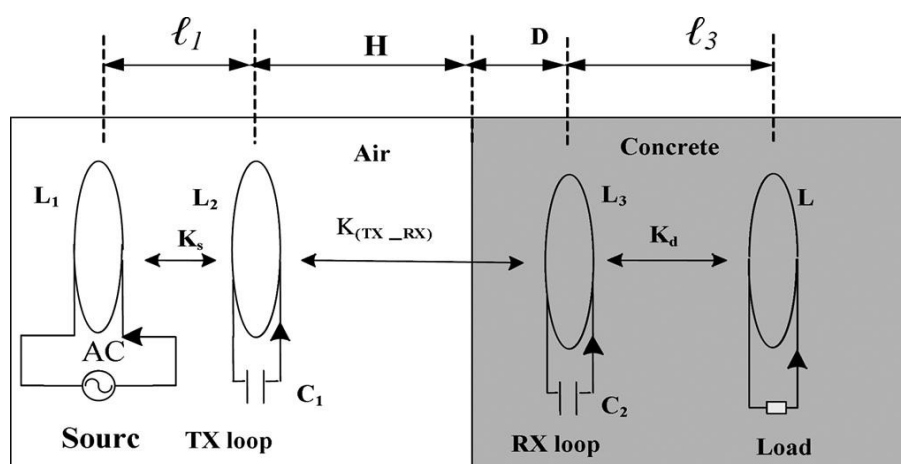


Figura 2 – Sistema de transmissão de energia por acoplamento magnético ar-concreto.[8-9]

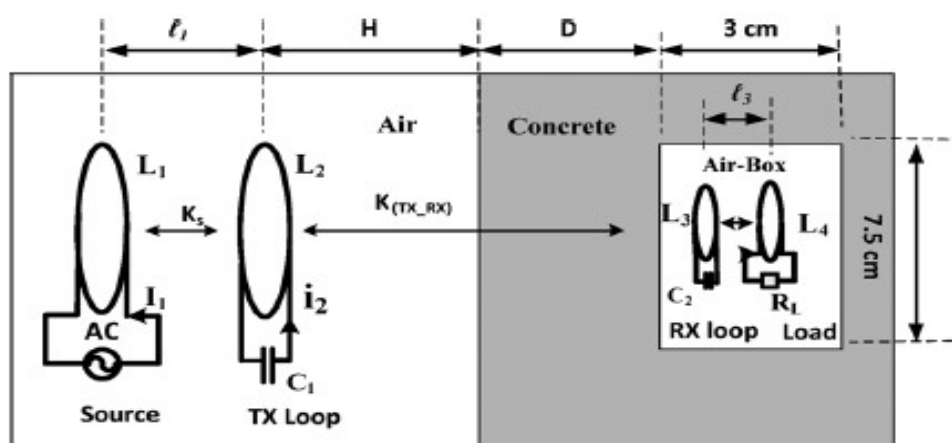


Figura 3 –Sistema de transmissão de energia por acoplamento magnético incluindo caixa de ar [8-9].

Nesse estudo feito para acoplamento magnético ar-concreto, seus projetistas melhoraram a eficiência do sensor colocando-o dentro de uma caixa de ar.

1.2.3. Energia automotiva

Em eletrônica automotiva, é utilizada para carregamento das baterias dos veículos, é retificada, e armazenada em baterias [10].

Na Figura 4, temos um novo conceito de transferência de energia sem contato, na qual uma antena transmissora conectada a uma fonte de alta frequência transfere energia a uma antena receptora, e esta é retificada por um circuito e armazenada em uma bateria.

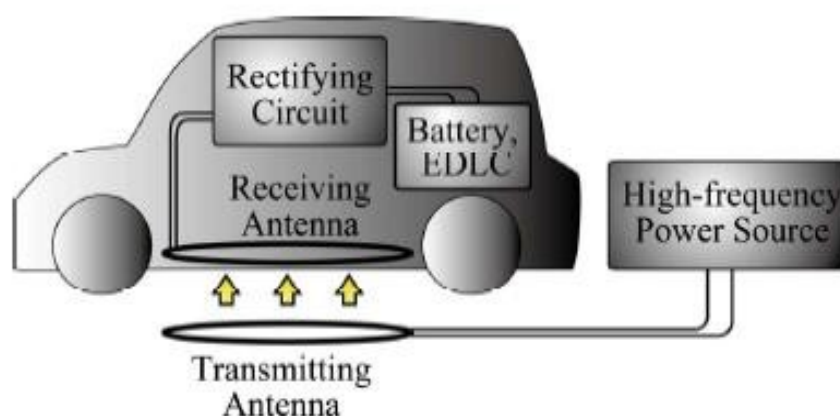


Figura 4- Conceito de sistema de transferência de energia sem contato para veículos elétricos [10].

Na área da energia alternativa, protótipos acoplados a painéis geradores de energia solar podem transferir energia, a qual é armazenada em baterias, reduzindo também os custos da instalação [10-11].

De uma maneira geral, pode-se dizer que a área de eletrônica de consumo, onde há enorme crescimento mercadológico (baterias de celulares, *tablets*, *notebooks*, etc.) também é potencialmente beneficiária de uma tecnologia desta natureza.

1.2.4. Objetivo geral

O objetivo do presente trabalho é estudar o acoplamento magnético forte entre conjuntos de ressoadores através de um estudo experimental, a fim de conhecer e avaliar os vários fenômenos que caracterizam este método de acoplamento. Para tal, serão apresentados resultados de um conjunto de medições nas várias configurações geométricas tais como posição e desalinhamento entre os ressoadores acoplados a fim de avaliar como influem na transmissão.

1.2.5. Objetivo específico

Avaliar como se comportam os valores de tensão de circuito aberto, e na carga, nas tres configurações adotadas pelo experimento, bem como os valores das eficiências e suas magnitudes.

1.2.6. Conclusões do capítulo

Desde que, Kurs ET tal em 2007 propõem energizar uma lâmpada a 0,5 m de distância, houve grande interesse por essa tecnologia. Com o crescente número de aparelhos eletrônicos abriu-se uma nova perspectiva para a utilização da energia sem fio. Com aplicações em diversas áreas tais como: biomédica, construção civil, carregamento de celulares, veículos automotores, etc.

A transferência de sinais elétricos, embora perfeitamente adequada para a transferência de informação, coloca inúmeras dificuldades para as aplicações de transferência de energia, a saber: como a de ter o receptor que ficar a curta distância da fonte transmissora, alto custo, e por operar em frequência de rádio, sofre algumas interferências. A eficiência de transferência de energia é baixa.

CAPÍTULO 2

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

1. 2.1 Equações de Maxwell

2. A teoria do Eletromagnetismo Clássico está sintetizada nas quatro (4) equações de Maxwell. Estas equações podem ser apresentadas ou na forma integral ou na forma diferencial.

Forma integral:

- $\oint_C \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = -\frac{d}{dt} \int_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{A}$
- $\oint_C \mathbf{B} \cdot d\mathbf{l} = \mu_0 \int_S \mathbf{j} \cdot d\mathbf{A} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{d}{dt} \int_S \mathbf{E} \cdot d\mathbf{A}$
- $\oint_S \mathbf{E} \cdot d\mathbf{A} = \frac{1}{\epsilon_0} \int_V \rho \, dV$
- $\oint_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{A} = 0$

Forma diferencial:

- $\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$
- $\nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{j} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}$
- $\nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0}$
- $\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$

3. A equação 2.1 traduz o fato de que o fluxo de um campo elétrico sobre uma superfície fechada (a superfície Gaussiana) em torno da carga é igual à carga dividida por ϵ_0 . Em outras palavras a fonte do campo elétrico é a carga elétrica, cuja unidade fundamental é a carga do elétron.
4. A segunda Equação de Maxwell na forma integral (Eq.2.2) indica que não existe um monopolo magnético, ou seja, uma carga magnética. De

fato analisando esta equação vemos que ela indica ser nulo o fluxo de $\mathbf{E}$ em torno de qualquer superfície fechada. Dada uma superfície desta natureza, toda componente do campo $\mathbf{E}$ que corta a linha “saindo” do volume encerrado pela superfície S será contrabalançado por uma componente do campo “entrando” no volume considerado, zerando o fluxo total.

5. A terceira equação de Maxwell (Eq. 2.3) diz respeito à correção introduzida por Maxwell sobre a Lei de Faraday. De fato se $\mathbf{E}$ for estático a circulação de $\mathbf{E}$ sobre um caminho fechado é zero, sendo conservativo. No entanto se consideramos um caminho fechado em uma região onde $\mathbf{E}$ é uma função explícita do tempo, existirá uma tensão induzida. Maxwell concluiu que a existência da tensão induzida deve-se a variação temporal do fluxo de $\mathbf{B}$.
6. A quarta equação na forma integral é a correção da Lei de Ampere. O primeiro a perceber a natureza do campo magnético $\mathbf{B}$ como descrevendo uma linha fechada em torno de um condutor foi Oersted. Oersted verificou experimentalmente que agulhas magnéticas se alinhavam formando uma “linha fechada” em torno de um condutor percorrido por uma corrente I . Ampere descreveu este fato pela sua equação:
- 7.
8. Maxwell acrescentou o termo da corrente de deslocamento resultando num aperfeiçoamento da Eq. de Ampere. As equações de Maxwell-Faraday e Maxwell-Ampere, (Eq. 2.3 e 2.4) são equações acopladas, isto é, em cada uma delas estão presentes os campos elétricos $\mathbf{E}(t)$ e magnético $\mathbf{B}(t)$. Uma inspeção revela que $\mathbf{E}(t)$ depende da variação temporal do fluxo magnético, e $\mathbf{B}(t)$ depende da variação temporal do fluxo de $\mathbf{E}(t)$. Maxwell compreendeu que o acoplamento destas equações sugere a existência da propagação de uma onda eletromagnética [17-18].

9. Devemos observar que as equações discutidas acima se referem ao espaço livre. A fim de considerar os campos na presença da matéria devemos mencionar as equações constitutivas:

- $\mathbf{D} = \epsilon_0 \mathbf{E} + \mathbf{P}$)
- $\mathbf{B} = \mu_0 (\mathbf{H} + \mathbf{M})$
- $\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E}$

Onde $\mathbf{D}$ é a densidade de fluxo elétrico, $\mathbf{E}$ é campo elétrico, $\mathbf{B}$ é a densidade de fluxo magnético, e $\mathbf{H}$ é o campo magnético. $\mathbf{J}$ é a densidade de corrente. Estas equações evidenciam a influência entre campo eletromagnético e a matéria [17-18].

2.2- Ondas eletromagnéticas

São produzidas por cargas elétricas aceleradas. Faraday mostrou que a variação do campo magnético gera um campo elétrico, e Maxwell por sua vez mostrou, que campos elétricos variáveis no tempo geram campos magnéticos. A sucessão de campos elétricos e magnéticos que se propagam pelo espaço livre é o campo eletromagnético. Este campo sendo uma onda eletromagnética está sujeito a fenômenos que ocorrem nas ondas, como difração, refração, reflexão, polarização. A Equação da onda eletromagnética é também conhecida por equação de Helmholtz [19-20]:

$$\nabla^2 \mathbf{E} = -\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2}$$

Onde pode ser o campo $\mathbf{E}$ ou o campo $\mathbf{H}$, isto é numa situação geral $\mathbf{E}$ e $\mathbf{H}$ são soluções das equações abaixo :

$$\nabla^2 \mathbf{E} = -\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2}$$

$$\nabla^2 \mathbf{H} = -\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial t^2}$$

No espaço livre

$$\nabla^2 \mathbf{E} = -\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2}$$

Usando as propriedades de transformada de Fourier podemos reescrever as equações de Helmholtz, e para o caso dos sinais monocromáticos no espaço livre temos:

Ondas eletromagnéticas transportam energia. O vetor de Poynting **S** descreve a grandeza vetorial que indica a potência, a direção e o sentido de propagação de uma onda:

$$\mathbf{S} = \frac{1}{\mu_0} (\mathbf{E} \times \mathbf{B})$$

2.3 – O circuito série RLC

Os circuitos transmissores e receptores (T_{RX} e R_X , respectivamente) estudados no presente trabalho são do tipo RLC série. Estes circuitos caracterizam-se por possuírem uma frequência de ressonância ω_0 . Sendo a impedância de entrada do RLC série dada por:

$$Z = R + j(\omega L - \frac{1}{\omega C})$$

Verifica-se que ω_0 é:

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

L e C são respectivamente a indutância e a capacitância do circuito. O circuito RLC série também denominado ressoador RLC caracteriza-se pela curva do módulo da impedância versus frequência (Figura. 5), de onde também se pode obter o fator de qualidade Q do ressoador:

$$Q = \frac{\omega_0 L}{R} = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}}$$

Onde:

ω_0 é a frequência de ressonância, R é a resistência e C é a capacitância, e a impedância Z é expressa por:

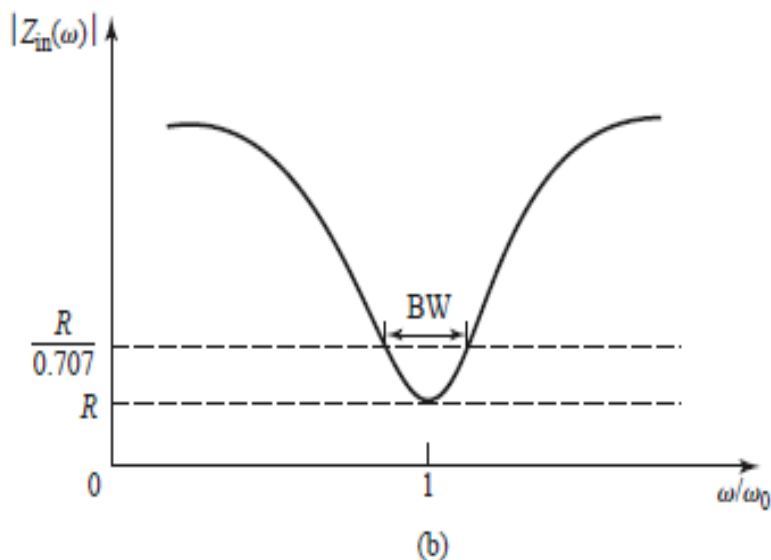


Figura 5 – Ressonador série RLC e sua resposta [20]

A figura 5 mostra a magnitude da impedância de entrada em função da frequência, ou seja, a resposta em frequência do circuito RLC. Observa-se que quanto menor for R , para um dado capacitor C , menor será a potência dissipada no circuito, e maior será o fator de qualidade Q . A largura de banda é mais estreita para valores menores de R indicando que o RLC está sintonizado quase que numa frequência única [19-20]. Quando dois circuitos RLC têm suas frequências de ressonância ω_0 coincidentes, são considerados alinhados em frequência.

2.4-Circuitos acoplados

Segundo a (lei de Faraday), se temos dois circuitos separados, porém próximos um do outro, uma corrente variando em um deles vai induzir uma força eletromotriz (FEM) no circuito vizinho [18]. O sentido da força eletromotriz induzida é tal que a corrente criada por ela em uma espira nas suas proximidades gera um campo magnético que se opõe ao campo do circuito que cria o campo original. Tal fenômeno é conhecido como indução (Lei de Faraday) e o sentido da corrente criada é descrito pela Lei de Lenz.

2.4.1 Circuito fechado

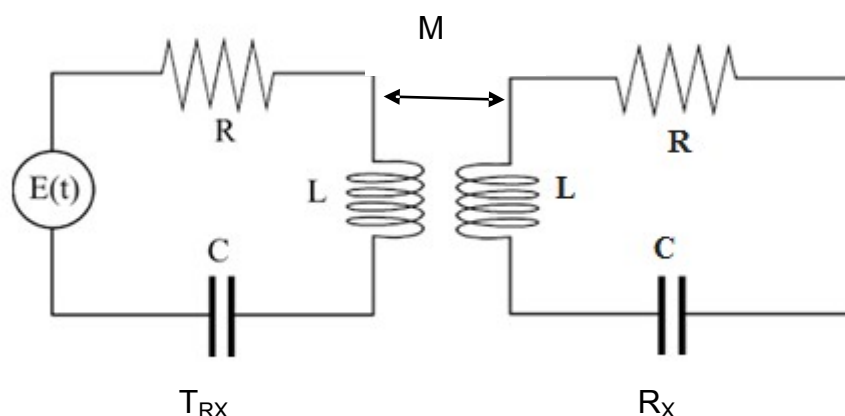


Figura 6 – Circuito RLC em circuito fechado

A lei de equações das malhas nos permite escrever no circuito RLC em questão:

—

Visto que, corrente e indutância mútua no receptor são muito pequenas, podemos desprezar o segundo termo e considerar que:

V_{TRX} -Tensão no transmissor; I – Corrente no transmissor; I – Corrente no receptor.

Como não temos fonte no lado do receptor podemos escrever:

Onde:

Em ressonância a corrente e a tensão estão em fase, ou seja, o ângulo $\omega_0 T = 0$, então a tensão na carga do receptor será:

2.4.2 Circuito aberto

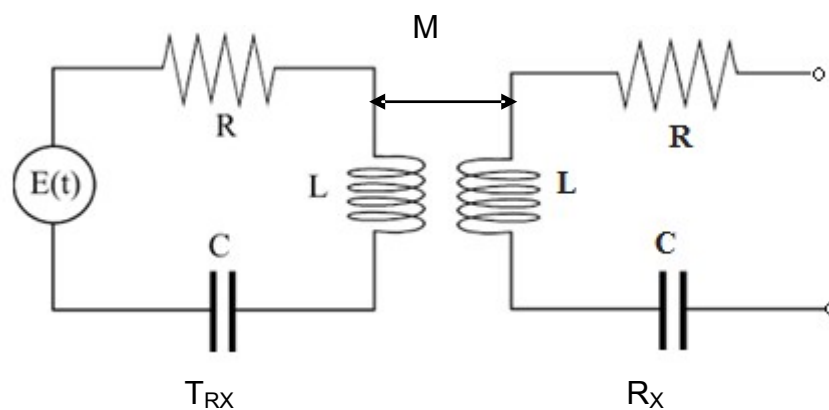


Figura 7- Circuito RLC em aberto

O circuito permite-nos escrever que a tensão de circuito aberto é:

Considerando o valor de I_1 na (Eq.2.30), e sabendo que na ressonância ω_0 .
 $T=0$ podemos concluir sobre a tensão de circuito aberto:

Onde:

M e L_1 – Indutância mútua e autoindutância do transmissor

M e L_2 – Indutância mútua e autoindutância do receptor

ω_0 – f_1 – Frequência em radiano por segundo (rad./s)

I_1 – Corrente no transmissor

I_2 – Corrente no receptor

R - Resistência de carga do circuito

V_{CO} – Tensão de circuito aberto no receptor

V_{TRX} -Tensão no transmissor

V_{RX} – Tensão no receptor

A indutância mútua depende somente da geometria dos sistemas acoplados.

O valor de uma indutância mútua entre dois circuitos acoplados pode ser obtido por aproximações matemáticas [18].

Considerando duas espiras paralelas o valor de M pode ser aproximado por [17]:

Onde:

E ainda:

–Raio de uma bobina

–Raio da outra bobina

Distância entre as bobinas

$$= \frac{\mu_0 \mu_r N^2 A}{l} \quad \text{— Permeabilidade no espaço livre —}$$

A indutância mútua é responsável pela transferência de energia entre os dois circuitos no acoplamento magnético forte [1-9]. O acoplamento magnético forte é possibilitado pelo enlace do fluxo do campo magnético **B** de uma das bobinas sobre a outra. Uma vez que $\mu_r = 0$ as linhas de campo de **B** são fechadas. Deste modo as linhas de uma bobina enlaça a bobina vizinha propiciando o aparecimento da força eletromotriz induzida.

O valor do campo B devido a uma bobina sobre o eixo da mesma, é determinado com razoável facilidade [17,18] através de:

$$\frac{\mu_0 I N^2 A}{2l}$$

O campo $B(r, \theta, \Phi)$ em coordenadas esféricas gerado por uma espira pode ser calculado através do Potencial Vetor A [17] :

$$\frac{\mu_0 I N A}{4\pi r^2} \sin^2 \theta$$

onde

Sendo **m** o momento magnético do dipolo formado pela espira, **a** a área da bobina, e **I**, a corrente elétrica.

2.5. Conceitos sobre antenas

O problema estudado neste trabalho trata da transmissão de ondas eletromagnéticas entre um transmissor e um receptor apresentando grandes semelhanças com o enlace de sinais entre duas antenas. É bem conhecido que para uma antena transmissora são definidas regiões do campo por ela gerada, por exemplo, o campo próximo e o campo distante. Para a transmissão de informação através de sinais eletromagnéticos o campo eletromagnético considerado é o campo distante. Para a transmissão do tipo

“*witricity*”, que é estudada no presente trabalho o campo eletromagnético considerado é o campo próximo. Dado que a teoria de antenas é bastante abrangente, podemos visualizar o nosso problema como um problema particular da teoria de antenas. A definição padrão do IEEE (*International Electric and Eletronic Engineers*) para antena é: “A estrutura de transição entre o espaço livre, e um dispositivo de guia que pode ser uma linha de transmissão, um cabo de forma axial ou um tubo oco, que é utilizado para o transporte de energia eletromagnética a partir da fonte transmissora para a antena, ou a partir da antena para o receptor”. No primeiro caso, temos uma antena transmissora e no último uma antena receptora [21].

No nosso estudo adotamos o ponto de vista da teoria de circuitos acoplados, no entanto faremos uma breve revisão da teoria de antenas para considerar as semelhanças entre os problemas abordados.

2.5.1 –Tipos de antenas

Segundo [20-21] a escolha do tipo de antena que deve ser escolhida num sistema de telecomunicações depende de diversos fatores como : frequência de operação, diretividade, espaço disponível, etc. A eficiência de uma antena depende da relação correta entre seu comprimento físico e o comprimento de onda do sinal que transmite ou recebe.

A impedância de entrada de uma antena apresentada é representada pela equação:

Onde :

Z_A – Impedância entre os terminais **a** e **b** da bateria

R_A – Resistência entre os terminais **a** e **b** da bateria

X_A – Reatância entre os terminais **a** e **b** da bateria

A parte resistiva consiste de duas componentes:

$$R_A = R_r + R_{rad}$$

R_r – Resistência de perdas

R_{rad} – Resistência de radiação

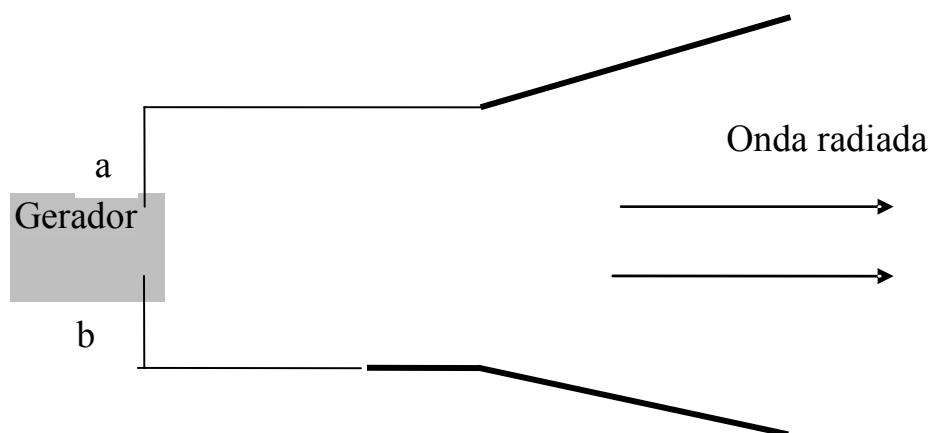


Figura 8 – Antena no modo transmissor

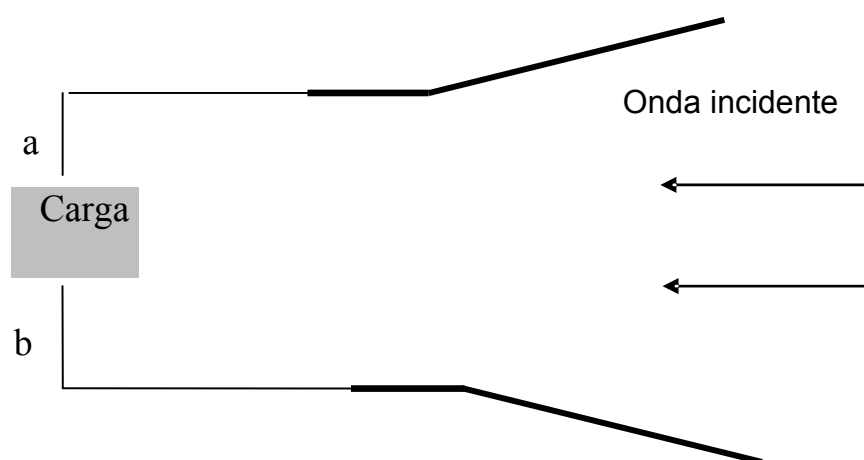


Figura. 9-Antena no modo receptor

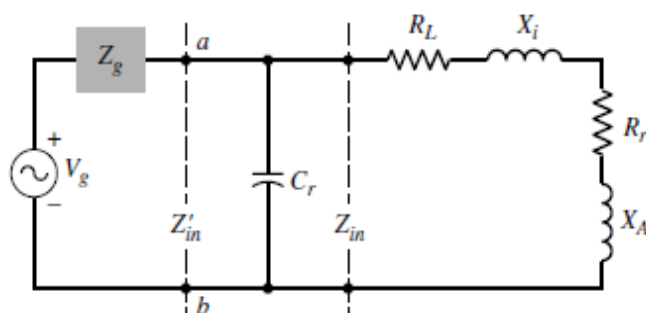


Figura .10 – Circuito equivalente da antena

A Figura 8 mostra a antena em modo de transmissão [21]. A Figura 9 mostra a antena no modo receptor [21]. A Figura 10 mostra o circuito equivalente de uma antena de quadro no modo de transmissão [21]. A Figura 11 o circuito equivalente de uma antena de quadro no modo de recepção [21].

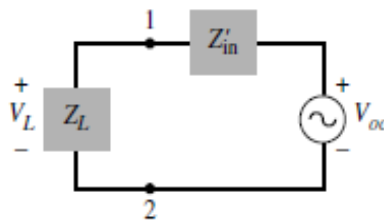


Figura 11 – Circuito equivalente no modo receptor

A impedância de entrada é representada por :

Onde : - Resistência de radiação

 - Resistencia de perdas

 - Reatância indutiva externa

 - Reatância indutiva interna de alta frequência

—

—

— — — — — Indutancia interna

— Permissibilidade do espaço

— Raio da bobina

— Diâmetro do fio da bobina

A profundidade de penetração do metal é muito pequena quando comparada com a seção transversal da haste, a corrente é confinada a uma camada fina próxima à superfície do condutor. A resistência de alta frequência pode ser escrita com base numa distribuição de corrente uniforme :

$$R_s = \frac{1}{\sigma \delta} \int_0^\delta j^2 dz$$

Além da impedância, outras características devem ser consideradas como: intensidade de radiação, ganho, diretividade, polarização, eficiência, área eficaz fazem parte do projeto de um sistema completo.

O ganho de uma antena está relacionado com a concentração de energia transmitida ou recebida em uma determinada direção, comparado com uma antena padrão *omnidirecional* tomada como referência: o ganho é dado por:

$$G = \frac{4\pi A_e}{\lambda^2} \quad \text{ou} \quad G = \frac{4\pi R_{rad}}{\lambda^2}$$

O ganho de uma antena é dado em decibel

$$G_{dB} = 10 \log_{10} G$$

A intensidade de radiação é definida como :

e a potência média total radiada :

A diretividade de uma antena está relacionada com sua intensidade de radiação máxima e média,

E o seu ganho de potência dado por:

O diagrama de radiação é a representação gráfica da distribuição espacial das propriedades de radiação da antena : potência ,intensidade de campo , fase e polarização [20,21]. As propriedades de radiação de uma antena variam conforme a frequência de operação.

A Figura 12 mostra um padrão tridimensional de radiação de uma antena Omnidirecional, no qual são mostrados os planos dos campos elétricos e magnéticos.

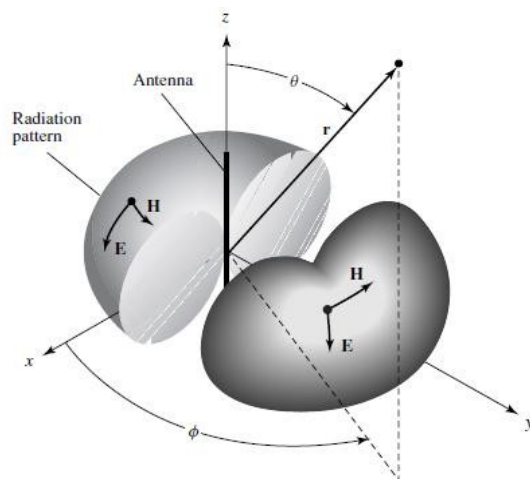


Figure 2.6 Omnidirectional antenna pattern.

Figura 12 – Antena padrão omnidirecional [20,21]

2.5.2. Regiões de campo de uma antena

Em geral uma antena apresenta três regiões de campos:

- a) O campo próximo reativo;
- b) o campo próximo radiante (região de Fresnel);

c) campo distante (região de Fraunhofer) [20,21].

A existência destes campos prende-se a relação entre as dimensões físicas e o comprimento de onda do sinal operado pela mesma. O campo próximo reativo é aquele cujas linhas de campo ainda estão fisicamente ligadas à antena. O campo próximo (região de *Fresnel*) se localiza a uma distância d com a condição $0,63 \{(D^3/\lambda)^{1/2}\} < d < \{2D^2/\lambda\}$. O campo distante (região de *Fraunhofer*) localiza-se em $d > \{2D^2/\lambda\}$. Vê-se de imediato que a dimensão maior, D , e a frequência de operação, determinam onde estão os campos próximos e distantes.

Região de campo distante

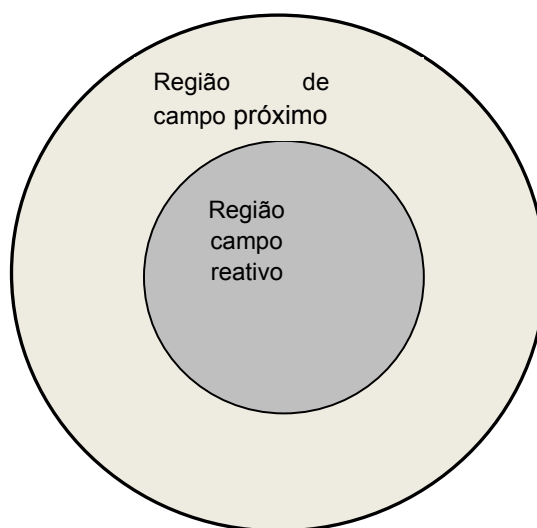


Figura.13 –Regiões de campo de uma antena [21].

2.6. Conclusões do capítulo

Portanto, podemos concluir dos conceitos apresentados sobre antenas, que são bastante próximos da teoria de dois ressoadores RLC em ressonância e acoplados magneticamente em alta frequência (em torno de 6000 kHz), no campo próximo.

Podemos observar que as equações para teoria de antenas, por exemplo a impedância, acrescentam-se resistências de perdas e de radiação em alta frequência, assim como a reatância de alta frequência.

No estudo em questão os ressoadores com circunferências pequenas (semelhantes à antenas de quadro) são raramente empregados como transmissores em radiocomunicação porque possuem resistências de radiação pequenas, geralmente menores que suas resistências de perdas.

Nesse trabalho, todos os experimentos foram realizados em região de campo próximo, onde o sinal operado, é menor que o comprimento de onda. Como veremos no capítulo 4 (página 50 , resultados experimentais) o comprimento de onda de cada conjunto ressoador, será sempre maior que o comprimento da antena, o que caracteriza uma antena de quadro pequena.

CAPÍTULO 3

MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Materiais

O presente estudo foi realizado com quatro grupos de bobinas circulares construídas com fios de cobre e dimensões variadas, mostradas na Tabela 1. Usando-se estas quatro bobinas, para cada uma delas foram usados 3 capacitores formando um total de 12 circuitos osciladores RLC. Este conjunto representa o total de amostras ensaiadas e estudadas.

Tabela. 1- Características dimensionais dos grupos de bobinas

TIPOS DE CONJ.	Número de espiras	Φ_{bob} (mm)	Φ_{fio} (mm)	Largura (mm)
CONJ. A	24	73,2	0,6	14,8
CONJ. B	24	73,2	0,5	13,0
CONJ. C	30	48	0,4	17,8
CONJ. D	51	71,8	0,5	25,5

A Figura 14 indica visualmente a representação de L e Φ cujos valores são indicados na Tabela 1. As bobinas foram todas construídas manualmente sob cilindros de PVC comerciais. Devido ao pequeno número de espiras tornou-se viável a construção manual.

As montagens experimentais foram realizadas com os capacitores indicados na Tabela 2.

Na figura 14 , é mostrado o modelo de bobina utilizada nos experimentos

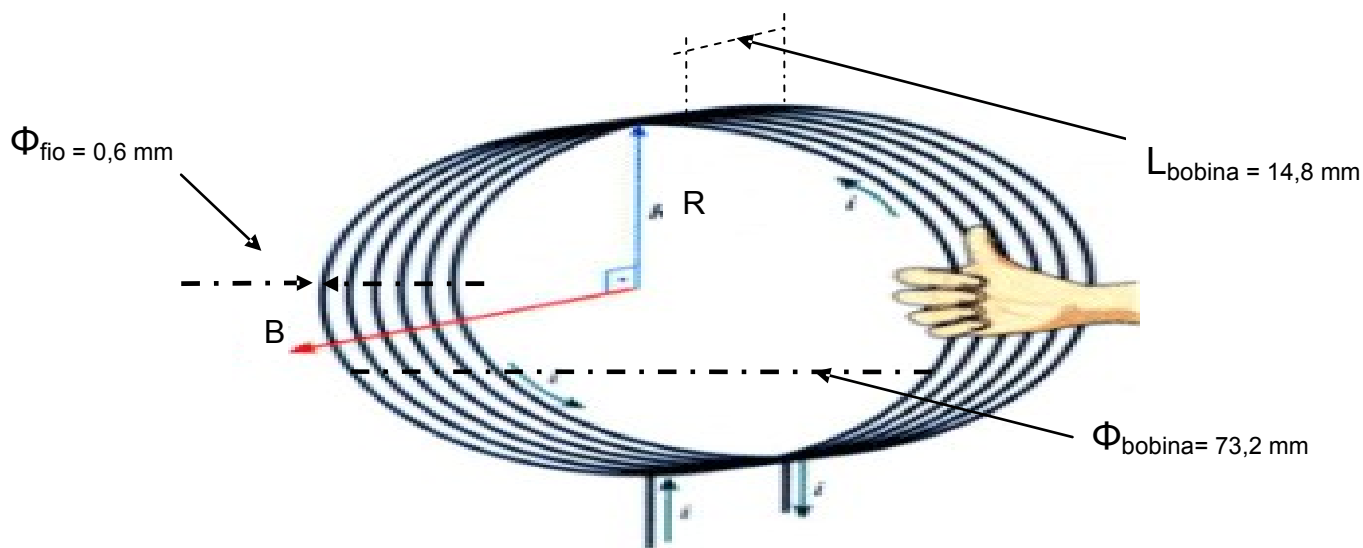


Figura 14: L é a largura da bobina; Φ_{bobina} e Φ_{fio} respectivamente ,
diâmetros da bobina e fio da bobina [22].

3.2 – Alinhamento em frequência e medição de f_0

A frequência ressonante de oscilação de cada um dos conjuntos pôde ser medida através do seguinte ensaio: alimentando-se cada um dos circuitos RLC por vez, com um gerador de sinais, fez-se uma varredura em frequência e pelo máximo da corrente em R (sendo $R=22 \text{ Ohms}$) foram obtidas as frequências de ressonâncias. Todos os pares de circuitos RLC foram alinhados em frequências para a realização do experimento. Os capacitores de cada conjunto e as frequências resultantes são apresentados na Tabela 2.

Tabela. 2- Capacitores e respectivas frequências em ressonância

TIPOS CONJ.	CAPACITORES (pf)			FREQUÊNCIAS (kHz)		
	C1	C2	C3	F1	F2	F3
CONJ. A	22	33	56	4430	3720	2960
CONJ. B	33	22	56	4400	5290	3480
CONJ. C	10	22	33	5000	3750	3200
CONJ. D	10	3	1	3190	4300	4850

3.3 Métodos

Neste capítulo nos referiremos aos circuitos osciladores (conjuntos A,B,C e D) como sendo ressoadores. Para a obtenção dos dados apresentados procedeu-se sempre aos seguintes passos:

- Os ressoadores tiveram suas frequências alinhadas como no item 3.1.2.
- Procedeu-se a colocação das bobinas nas posições de ensaio (alinhadas, com deslocamento lateral, ou com desalinhamento angular).
- Foram realizadas medições das tensões de circuito aberto, V_{oc} e na carga V_{CARGA} do receptor sempre na condição de ressonância.
- Para cada uma das condições de ensaio a distância entre as bobinas foram variadas. Os valores de distância foram sempre 4,0cm, 8,0cm, 12cm e 20cm.

3.3.1) Alinhamento linear: As bobinas transmissora e receptora são mantidas colineares e as medidas foram feitas afastando-se o R_x do T_{RX} sobre o eixo principal (Eixo da bobina do ressoador transmissor T_{RX}).

3.3.2) Deslocamento Lateral: O eixo do R_x é desalinhado em relação ao eixo principal mantendo-se ambos paralelos e foram realizadas medidas afastando-se o ressoador receptor do ressoador transmissor.

3.3.3) Desalinhamento Angular : quando o afastamento é realizado sobre o eixo principal porém o eixo do ressoador R_x forma um ângulo θ com o eixo principal. Estes procedimentos têm seus valores mostrados na Tabela 3.

Tabela. 3 –Valores dos afastamentos entre conjuntos T_{RX} e R_x

Afastamento Linear(cm)	Afasamento. Lateral (cm)	Afastamento Angular(graus)
4	1	10
8	2	20
12	3	30
20	4	40
-	5	50

Na sequência, são mostrados nas Figuras 15, 16, 17, e 18 ,os conjuntos trabalhados e as respectivas configurações, nas quais foram coletadas todas as medidas apresentadas neste trabalho.



Figura 15 – Conjuntos de bobinas utilizadas na coleta de dados

A Figura 16 mostra um conjunto de bobinas com configuração de afastamento linear em relação ao eixo principal que passa pelo centro das mesmas.



Figura 16-Afastamento linear e equipamentos utilizados

A figura 17 Mostra o arranjo típico de uma medição com os conjuntos de bobinas que apresentam um deslocamento lateral do ressoador receptor em relação ao eixo central (deslocamento lateral).

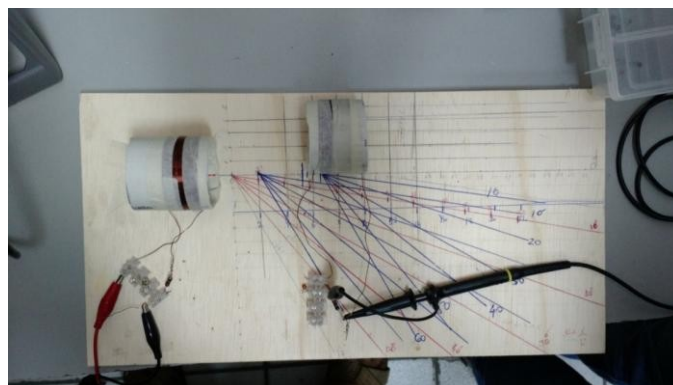


Figura 17-Deslocamento lateral

Na Figura 18 é apresentado o esquema experimental típico de uma medição realizada com deslocamento angular. Os diversos valores angulares em conjunto com as variações de distância podem ser observados na superfície de alinhamento utilizada.

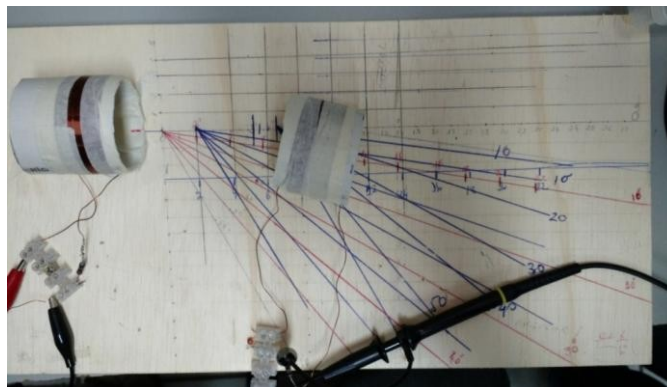


Figura. 18-Desalinhamento angular

A figura 18 mostra outro conjunto, que apresenta uma configuração angular em relação ao eixo principal.

3.4 Medições

As medições foram realizadas a fim de obtermos a tensão de circuito aberto e a tensão na carga, no receptor.

Para a medição da tensão de circuito fechado foi empregada a montagem da Figura 19, onde as tensões de circuito fechado foram medidas sobre o resistor R do receptor, que tem valor igual no transmissor.

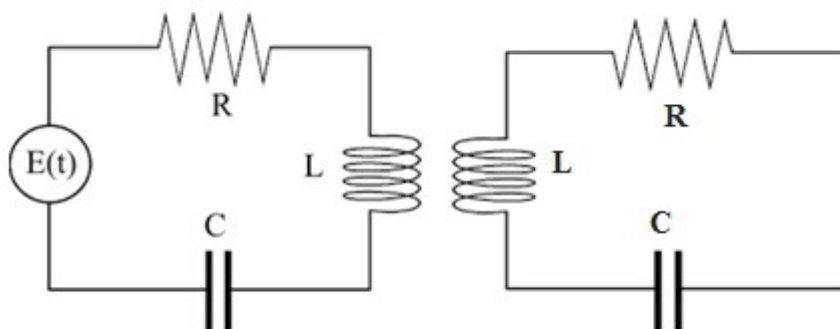


Figura19- Medição da tensão circuito fechado.

Para a medição da tensão de circuito aberto foi empregada a montagem da Figura 20, sendo as tensões medidas nos terminais abertos de saída do receptor.

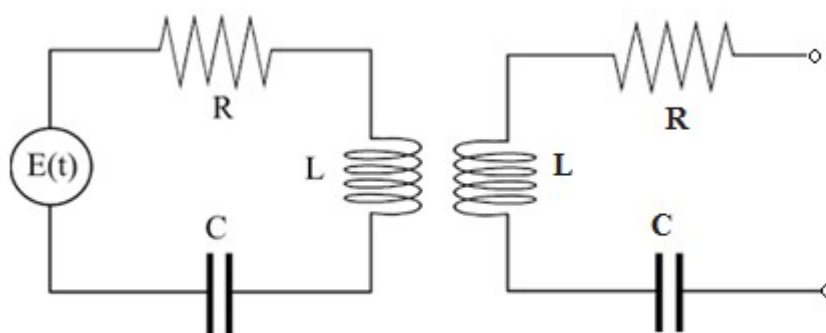


Figura.20- Medição de tensão em circuito aberto

3.5 Equipamentos Utilizados

- a) Gerador de Sinais AGILENT modelo 33500B
- b) Osciloscópio TEKTRONIX modelo TDS2022C
- c) Paquímetro com nônio de 10mm (resolução 0,1 mm)

3.6 Conclusões do capítulo

Como vimos, o estudo foi realizado com quatro grupos de bobinas de diâmetros diferentes, fios também com diâmetros diferentes, as quais foram alinhadas tanto em frequência quanto pelo tipo de configuração (linear, lateral e angular), espaçadas de certa distância.

Capacitores com frequências também diferentes foram utilizados para cada conjunto, e as medições de tensão de circuito aberto e na carga foram feitas utilizando: um gerador de sinal com frequência de até 20 MHz e um osciloscópio para medição de tensão de até 12 VAC.

Algumas distorções no sinal foram notadas quando utilizamos a bobina do grupo C, devido ao fator geometria da mesma (pequeno diâmetro), mas nada que impedisse que realizássemos a leitura.

CAPÍTULO 4

RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados experimentais do estudo sobre o acoplamento magnético forte entre ressoadores RLC.

4.1- Introdução

Os circuitos RLC utilizados podem ser considerados como uma antena de quadro circular, uma vez que satisfazem a relação — o

que caracteriza uma antena de quadro pequena, onde λ é o comprimento de onda, L o comprimento da antena e r o raio da bobina [19]. Investigando a relação entre as frequências de operação, os comprimentos de onda e as dimensões físicas dos ressoadores, temos os resultados apresentados nas Tabelas 4 a 7, são mostrados os valores das frequências de ressonância de todos os conjuntos, assim como os valores dos comprimentos de ondas.

Tabela. 04

Conjunto A

f(kHz)	λ (m)
4430	67,72
3720	100,15
2960	101,35

Tabela. 05

Conjunto B

f (kHz)	λ (m)
4400	68,18
5290	71,83
3480	86,20

Tabela. 06

Conjunto C

f(kHz)	λ (m)
5000	76,00
3750	101,33
3200	118,75

Tabela. 07

Conjunto D

f (kHz)	λ (m)
3190	119,12
4300	88,37
4850	78,35

Os valores apresentados caracterizam todos os ressoadores estudados como uma antena de quadro. Caracterizam também uma operação no campo próximo.

4.2 Resistências de perda e resistências de radiação

Os valores de resistências de radiação (), resistências de perdas () e da profundidade de penetração () são apresentados nas (Tabelas 4 a 8) . Os valores de e são calculados conforme equações 4.1 e 4.2 [19].

Tabela. 08

Grupo	R_{rad} (Ohms)	R_p (Ohms)	f (kHz)	δ (m)
A	3,71E-03	5,13E-02	4430	1,00E-03
	7,49E-04	4,70E-02	3720	1,09E-03
	7,14E-04	4,19E-02	2960	1,23E-03

Tabela. 09

Grupo	R_{rad} (Ohms)	R_p (Ohms)	f (kHz)	δ (m)
B	8,55E-07	1,40E-01	4400	1,01E-03
	6,94E-07	1,54E-01	5290	9,17E-04
	3,34E-07	1,25E-01	3480	1,13E-03

Tabela. 10

Grupo	R_{rad} (Ohms)	R_p (Ohms)	f (kHz)	δ (m)
C	3,26E-03	9,24E-02	5000	1,00E-03
	1,03E-03	8,47E-02	3750	1,09E-03
	5,48E-04	7,56E-02	3200	1,23E-03

Tabela. 11

Grupo	R_{rad} (Ohms)	R_p (Ohms)	f (Khz)	δ (m)
D	1,62E-03	1,09E-01	3190	1,18E-03
	5,37E-03	1,26E-01	4300	1,02E-03
	8,69-E03	1,34E-01	4850	9,58E-04

A resistência de radiação é dada pela equação

$$R_{RAD} = \frac{20 \pi^2}{\lambda^2} \left(\frac{a}{N} \right)^2 \quad (2.23)$$

Onde, R_{RAD} é a resistência de radiação, λ é o comprimento de onda, a é o raio da bobina e N é o número de espiras; uma análise dos valores da resistência de radiação sugere que os valores da potência radiada (campo distante) são muito pequena, várias ordens de grandeza inferiores a potência transferida no campo próximo. ($R_{RAD} = 22$ Ohms). Deste modo foi analisado o acoplamento magnético forte usando-se a teoria de circuitos, conforme foi apresentado nos capítulos 2 e 3. A avaliação da resistência de perdas R_p também é feita usando-se a Equação

$$R_p = \frac{2 \pi a^2 N^2}{\delta} \left(\frac{\sigma}{r} \right) \quad (2.24)$$

Onde a = raio da bobina, N = número de espiras, δ = profundidade de penetração, σ = condutividade do cobre, r = raio da seção do fio, sendo

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\sigma \omega \mu_0 \mu_r}} \quad (2.25)$$

Onde ω é a frequência de ressonância dos ressoadores, σ é a condutividade do cobre e μ_r é a permeabilidade do espaço livre. Os parâmetros Q , M e L foram calculados e mostrados em tabela.

4.3 Valores do Fator de Qualidade Q , indutância mútua M e auto-indutância L dos ressoadores

Os valores estão apresentados na Tabela 12. O valor de Q foi obtido a partir da Eq. 2.23. Os valores de M foram obtidos da Equação 2.38 e 2.39.

Tabela.12 – Parâmetros dos quatro conjuntos do circuito RLC

CONJUNTOS	Q	M	L
A	75,98	2,98E-9	9,81E+6
B	50,00	2,98E-9	1,45E+7
C	144,75	8,33E-10	8,87E+6
D	226,89	2,82E-9	2,31E+6

4.4 – Valores calculados de eficiência

Nas tabelas 13 a 16, são apresentados os dados calculados dos valores da eficiência da transmissão de cada conjunto T_{RX} e R_X . Os valores foram calculados em conformidade com as equações 4.5 a 4.7

)

Onde P_{RX} – é a potência no receptor e P_{TRX} é a potência do transmissor ;
 V_{TRX} , Tensão de entrada do transmissor, V_X , Tensão no receptor , R é a
 resistência de carga , I_1 Corrente no transmissor , I_2 corrente no receptor e
 é a eficiência em percentual. Nas tabelas 13 a 24 são apresentados os
 dados calculados dos valores da eficiência da transmissão de cada conjunto
 T_{RX} e R_X .

Tabela.13

		EFICIÊNCIA – (%)			
	Distância (cm)	Linear	Lateral	Angular	Frequência (kHz)
BOBINA A	4,00	18,11	18,11	0,54	4430
	8,00	2,8	19,34	0,93	
	12,00	1,82	18,72	0,32	
	20,00	0,31	17,51	1,7	

Tabela.14

		EFICIÊNCIA – (%)			
	Distância (cm)	Linear	Lateral	Angular	Frequência (kHz)
BOBINA B	4,00	28,70	21,50	0,88	4400
	8,00	73,47	19,04	2,88	
	12,00	13,40	3,47	1,94	
	20,00	0,27	0,07	0,008	

Tabela.15

		EFICIÊNCIA – (%)			
	Distância (cm)	Linear	Lateral	Angular	Frequência (kHz)
BOBINA C	4,00	20,66	19,31	27,32	5000
	8,00	0,11	0,13	9,55	
	12,00	1,47	1,47	28,12	
	20,00	1,09	1,09	25,00	

Tabela.16

		EFICIÊNCIA – (%)			
	Distância (cm)	Linear	Lateral	Angular	Frequência (kHz)
BOBINA D	4,00	5,44	7,11	2,67	3190
	8,00	17,36	25,00	6,08	
	12,00	11,11	11,11	4,69	
	20,00	4,00	3,36	1,21	

Tabela. 17

		EFICIÊNCIA – (%)			
	Distância (cm)	Linear	Lateral	Angular	Frequência (kHz)
BOBINA A	4,00	13,30	3,32	0,37	3720
	8,00	15,88	3,97	0,64	
	12,00	2,74	0,68	0,24	
	20,00	0,04	0,01	0,29	

Tabela. 18

		EFICIÊNCIA – (%)			
	Distância (cm)	Linear	Lateral	Angular	Frequência (kHz)
BOBINA B	4,00	13,30	14,95	10,21	5290
	8,00	10,70	0,12	12,49	
	12,00	1,27	2,35	11,96	
	20,00	0,01	0,09	12,49	

Tabela. 19

		EFICIÊNCIA – (%)			
	Distância (cm)	Linear	Lateral	Angular	Frequência (kHz)
BOBINA C	4,00	4,03	4,03	3,87	3750
	8,00	3,71	3,71	3,55	
	12,00	2,18	2,18	3,25	
	20,00	1,32	1,32	2,96	

Tabela. 20

		EFICIÊNCIA – (%)			
	Distância (cm)	Linear	Lateral	Angular	Frequência (kHz)
BOBINA D	4,00	0,01	0,05	0,01	4300
	8,00	0,06	0,25	0,01	
	12,00	0,12	0,49	0,01	
	20,00	0,12	0,47	0,01	

Tabela. 21

		EFICIÊNCIA – (%)			
	Distância (cm)	Linear	Lateral	Angular	Frequência (kHz)
BOBINA A	4,00	29,97	29,97	29,03	2960
	8,00	42,93	10,73	24,57	
	12,00	1,72	1,72	26,75	
	20,00	0,37	0,09	24,57	

Tabela. 22

		EFICIÊNCIA – (%)			
	Distância (cm)	Linear	Lateral	Angular	Frequência (kHz)
BOBINA B	4,00	14,95	14,95	13,94	3480
	8,00	0,12	15,47	16,0	
	12,00	2,35	17,64	14,95	
	20,00	0,09	18,78	14,44	

Tabela. 23

		EFICIÊNCIA – (%)			
	Distância (cm)	Linear	Lateral	Angular	Frequência (kHz)
BOBINA C	4,00	33,9	40,86	32,45	3200
	8,00	53,90	47,59	31,02	
	12,00	28,26	53,90	23,14	
	20,00	14,42	48,47	25,64	

Tabela. 24

		EFICIÊNCIA – (%)			
	Distância (cm)	Linear	Lateral	Angular	Frequência (kHz)
BOBINA D	4,00	0,05	0,01	0,01	4850
	8,00	0,04	0,01	0,01	
	12,00	0,04	0,01	0,01	
	20,00	0,05	0,01	0,01	

4.6 – Gráficos – Impedâncias x frequências

As figuras 21 a 29 mostram as respostas em frequência de cada ressoador, obtidas da seguinte maneira: em linhas vermelhas estão indicados os valores teóricos obtidos a partir das equações de impedância vs frequência (capítulo 2 Eq.-2.24). Em linha azul estão os valores experimentais. A nosso ver este conjunto de medidas é particularmente importante, pois demonstram que o modelo de circuito RLC adotado para a análise dos resultados é adequado.

Em outras palavras, todas as medições realizadas estão compatíveis com o modelo RLC adotado.

Tabela. 25– Valores teóricos e experimentais das impedâncias dos conjuntos

CONJUNTOS	FREQUÊNCIA (kHz)	Z TEÓRICO (Ω)	ZEXPERIM. (Ω)
A	4430	22	44,00
	3270	22	43,37
	2960	22	44,00
B	4400	22	44,00
	5290	22	43,37
C	5000	22	66,78
	3750	22	44,00
D	4300	22	44,00
	4850	22	44,00

Figura. 21

Grupo A

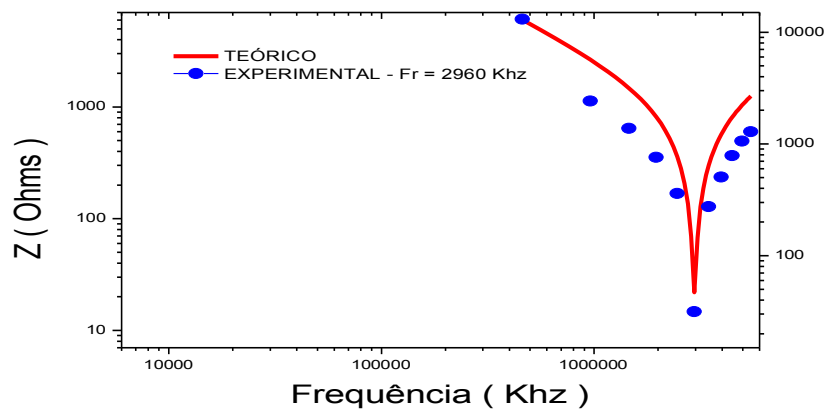


Figura. 22

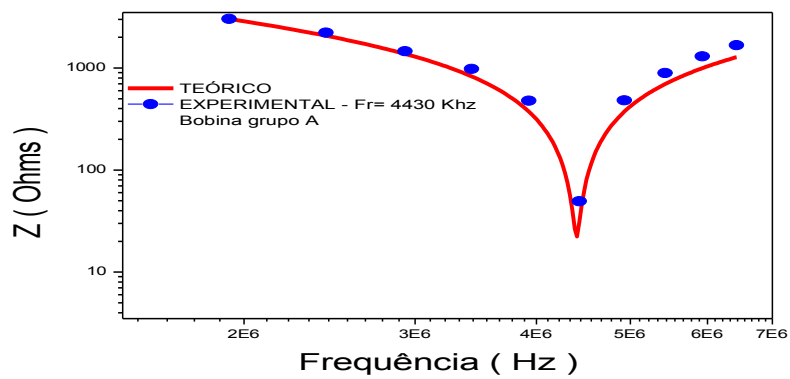


Figura. 23

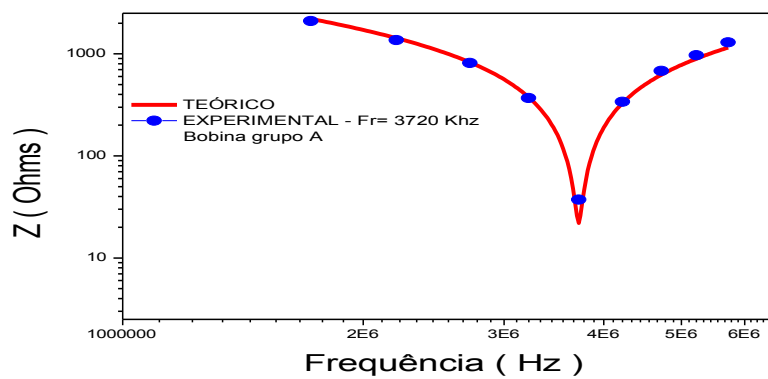


Figura.24

GRUPO B

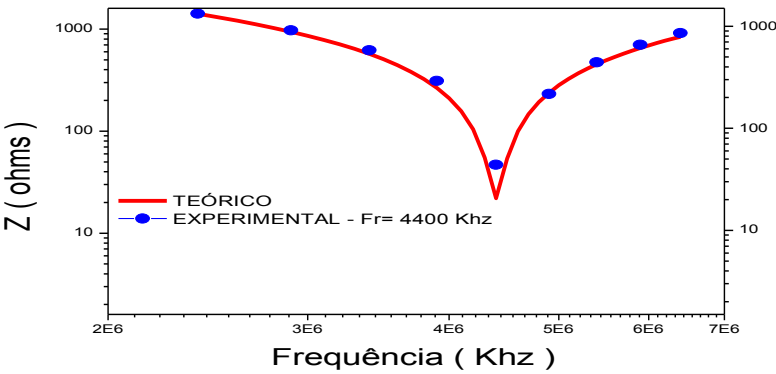
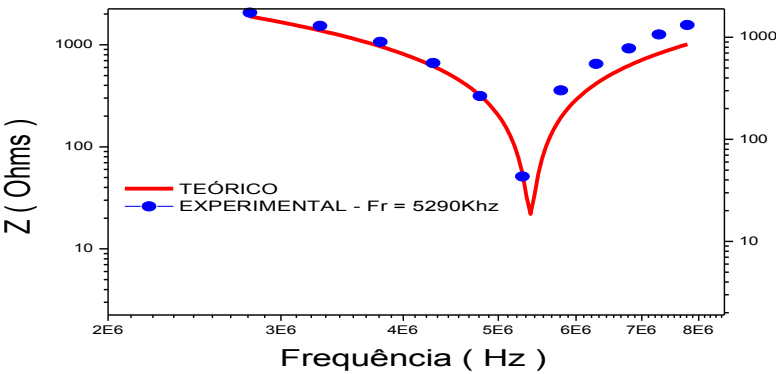


Figura.25



GRUPO C

Figura.26

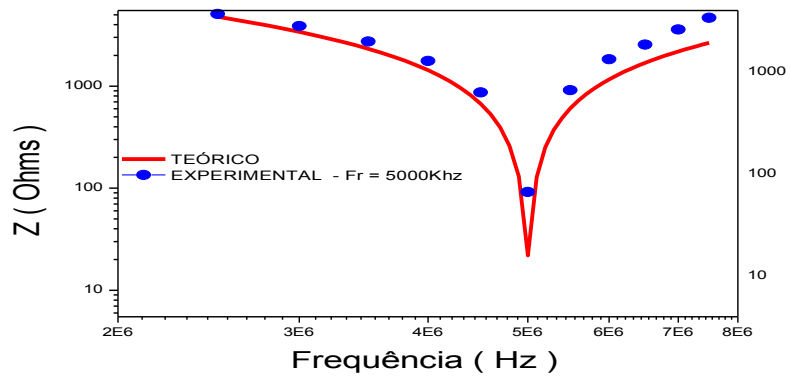
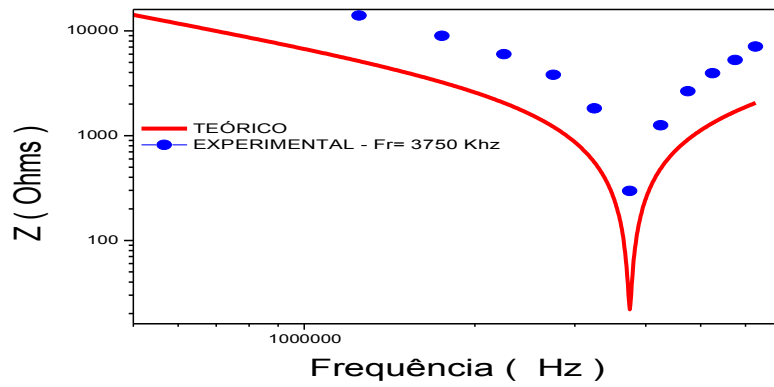


Figura. 27



GRUPO D

Figura. 28

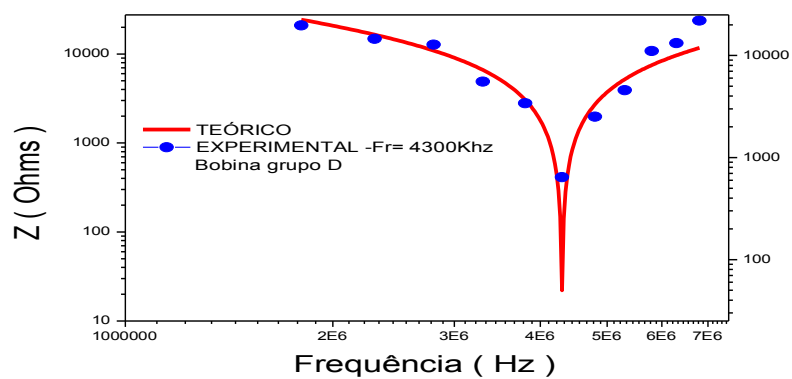
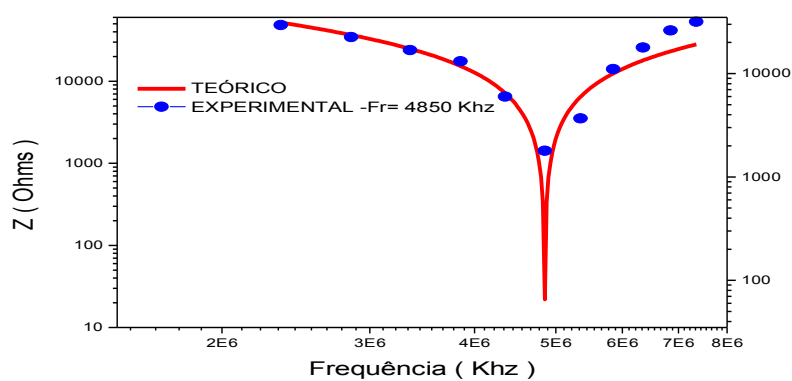


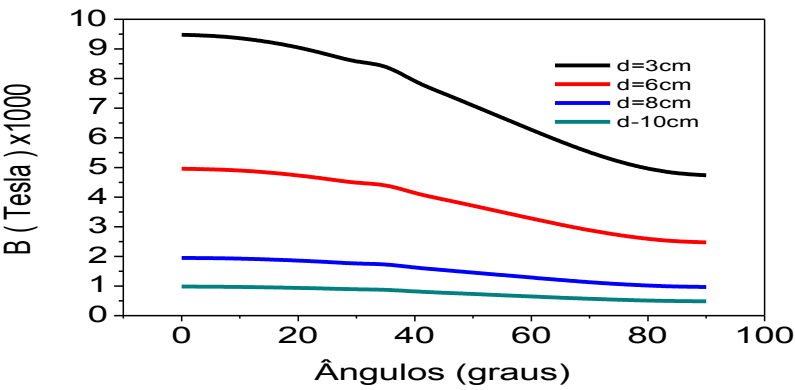
Figura. 29

4.7 Valores teóricos de B

Tendo em vista que o campo B devido a uma espira é dado pela Equação 2.33 apresentamos nas figuras 30 a 33, os valores teóricos de B em função da distância r e do ângulo θ , em coordenadas cilíndricas.

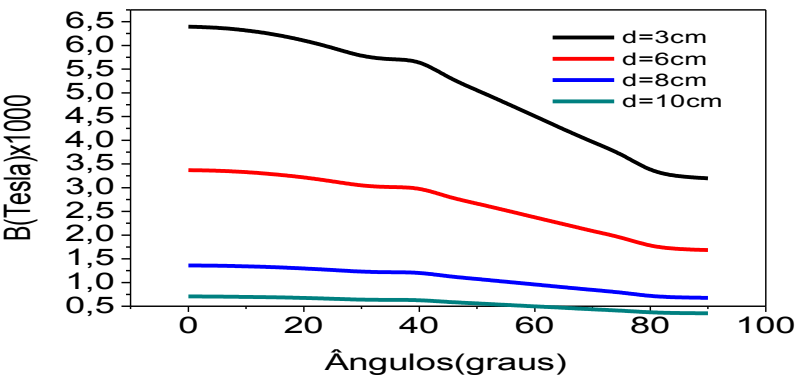
GRUPO A

Figura. 30



GRUPO B

Figura.31



GRUPO C

Figura.32

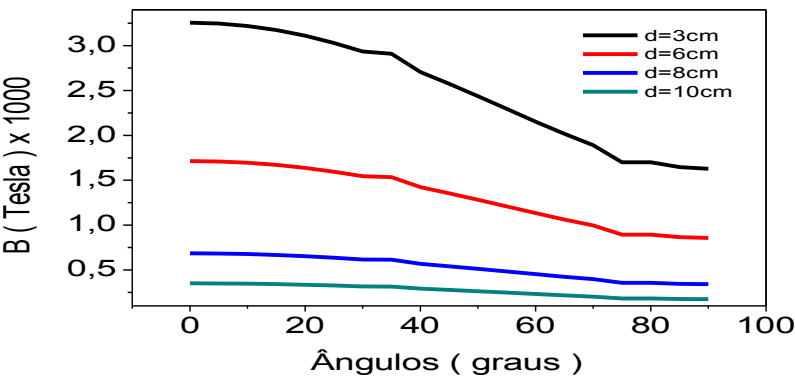
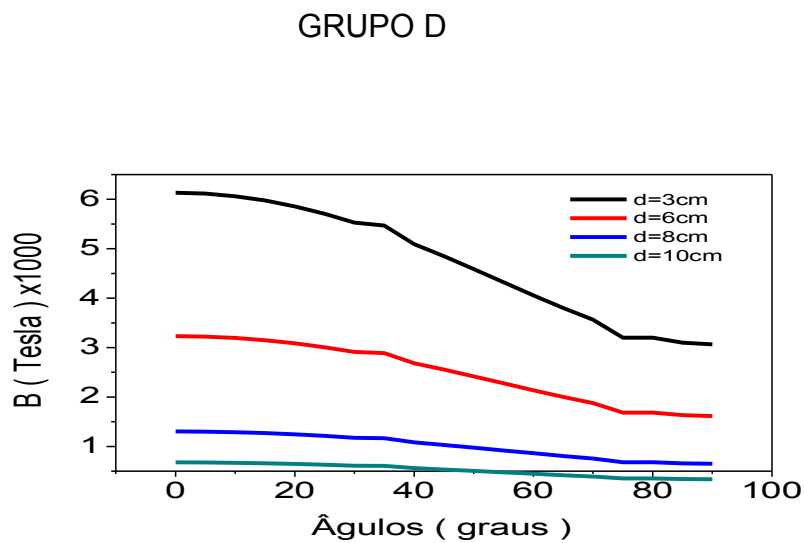


Figura. 33



4.8 Indutâncias Mútuas

Estas indutancias mútuas foram calculadas de acordo com as equações 2.38 e 2.39. Nas figuras 34 a 37 , verificamos os valores de M versus a distância entre as bobinas.

Figura.34

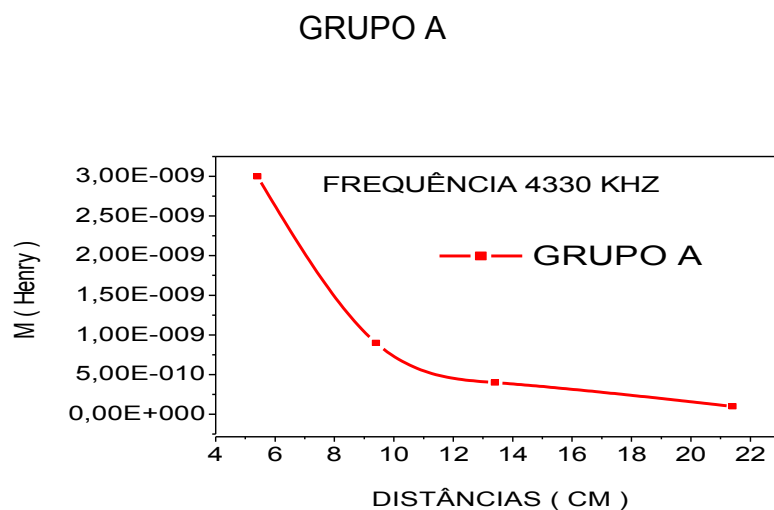
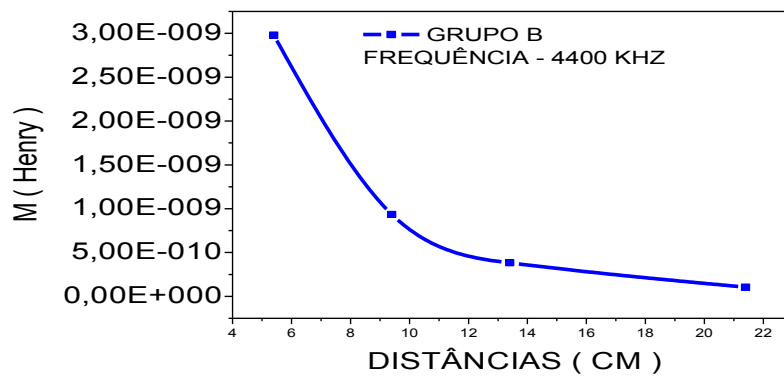


Figura.35

GRUPO B



GRUPO C

Figura.36

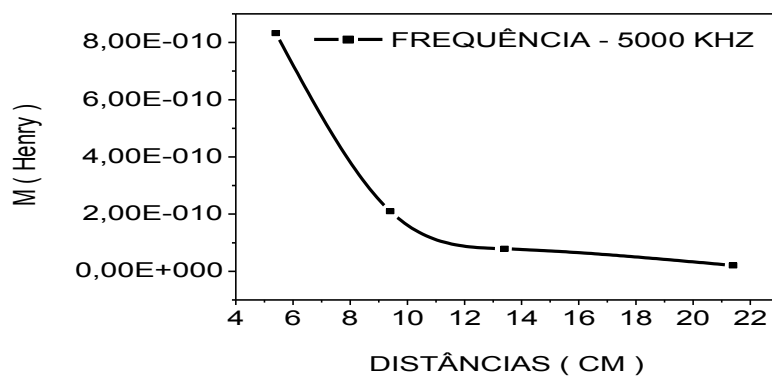
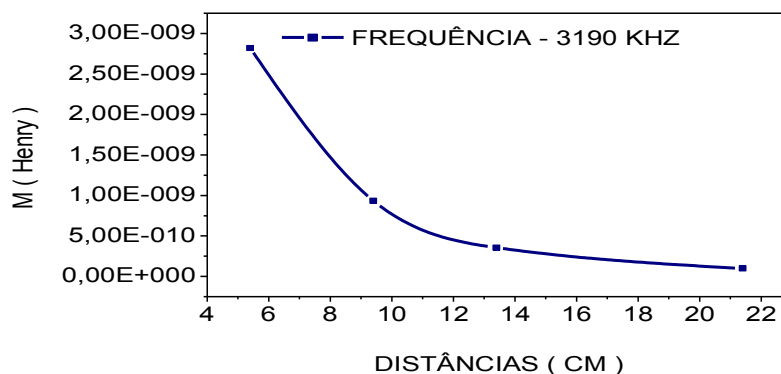


Figura.37

GRUPO D

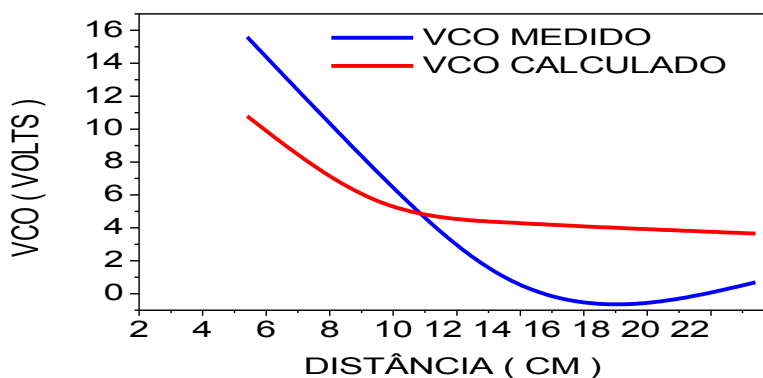


4.9 Valores experimentais e calculados das tensões

Observando os valores medidos e calculados para as tensões de circuito aberto no receptor, apresentados nas figuras 38 a 41, e levando em conta as tendências verificadas nas figuras apresentadas em 34 a 37, verificamos que os resultados experimentais estão coerentes com a análise teórica. Algumas discrepâncias existem, no entanto podem ser atribuídas às irregularidades de construção das peças.

GRUPO A

Figura.38



GRUPO B

Figura.39

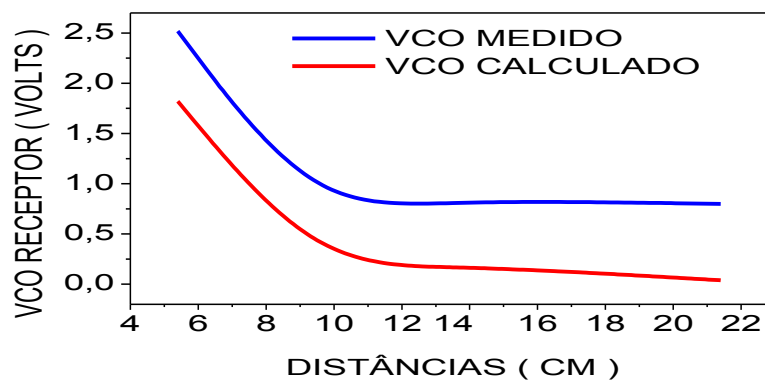
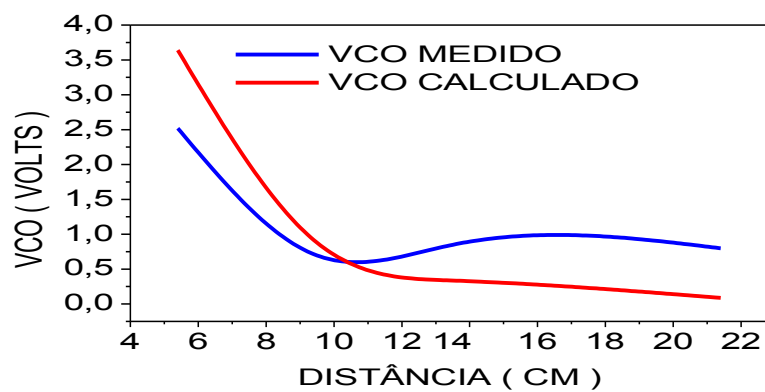


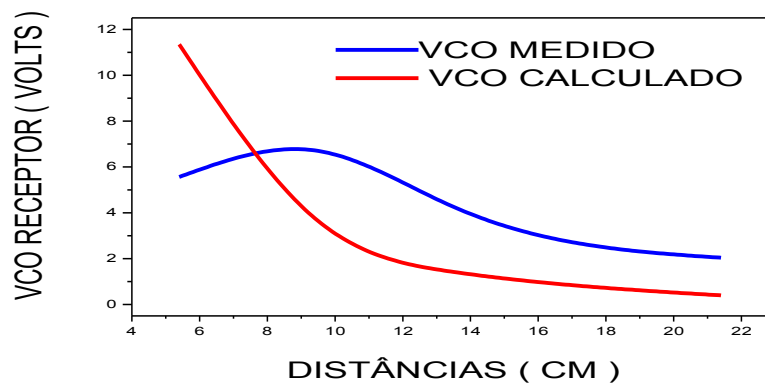
Figura.40

GRUPO C



GRUPO D

Figura.41

**4.10 – Medidas das tensões**

Nas Tabelas 26 a 61 do apêndice (Páginas 82 a 93), são apresentados os valores medidos das tensões de circuito aberto e tensões na carga no receptor, para todos os grupos de circuitos RLC. Para cada ressoador são apresentadas as medições de todas as configurações, ou seja, afastamentos lineares, laterais e angulares. As frequências ressonantes entre transmissor e receptor e distâncias entre os mesmos são também apresentadas. Nas configurações lateral e angular, foram utilizadas distâncias de 4 cm entre o T_{RX} e o R_X . A tensão aplicada ao transmissor foi sempre 6,0 VAC.

Figura. 42

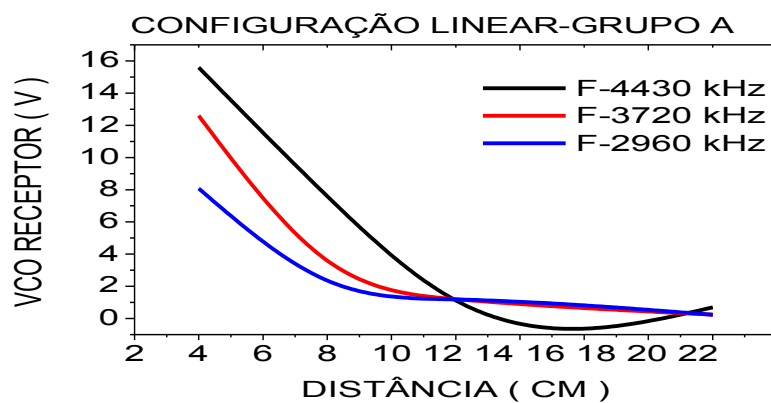


Figura. 43

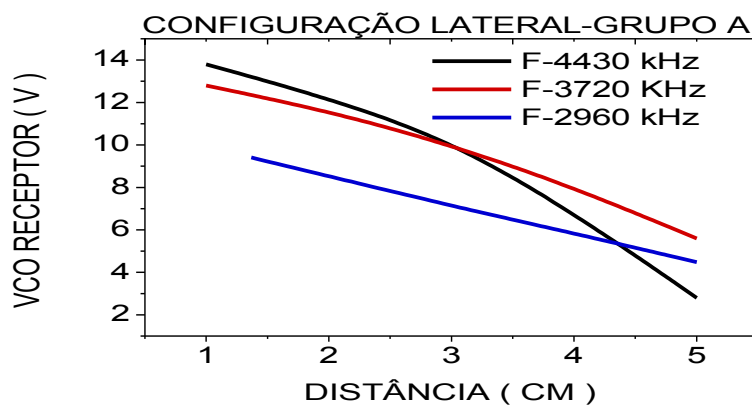


Figura. 44

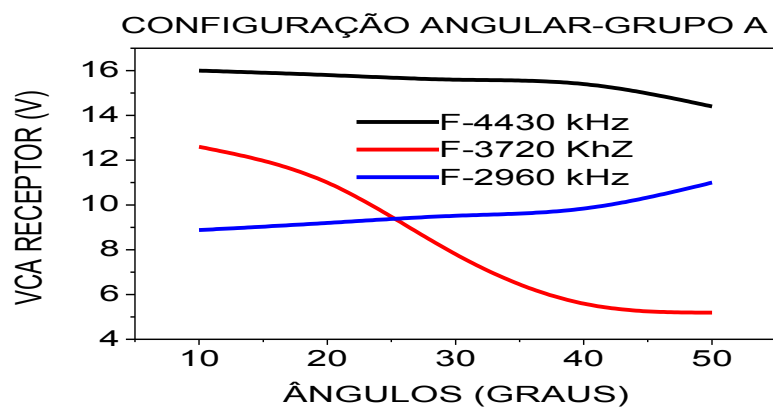


Figura. 45

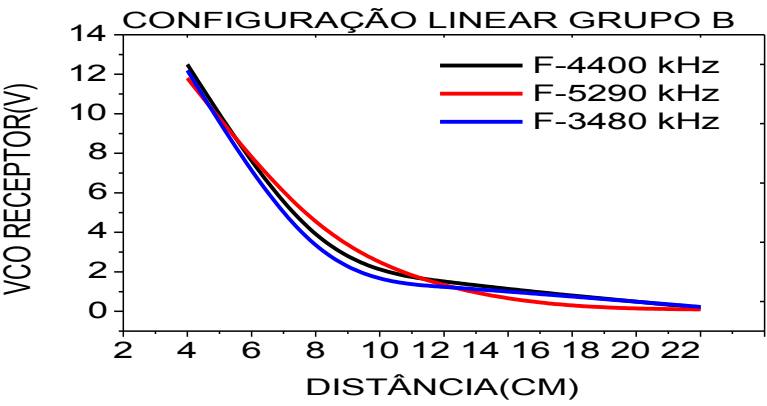
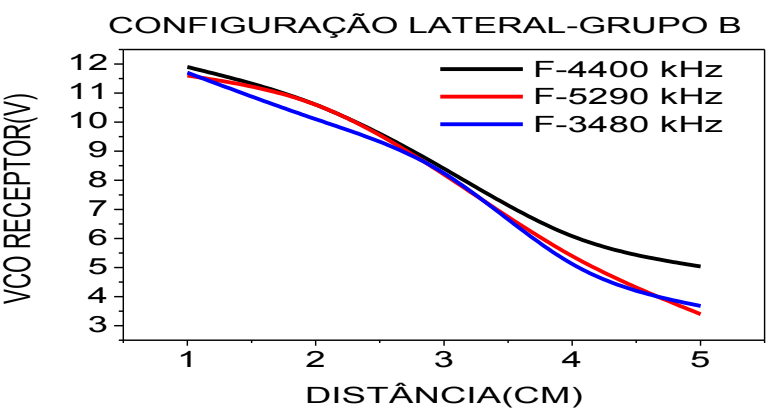


Figura. 46



GRUPO C

Figura. 47

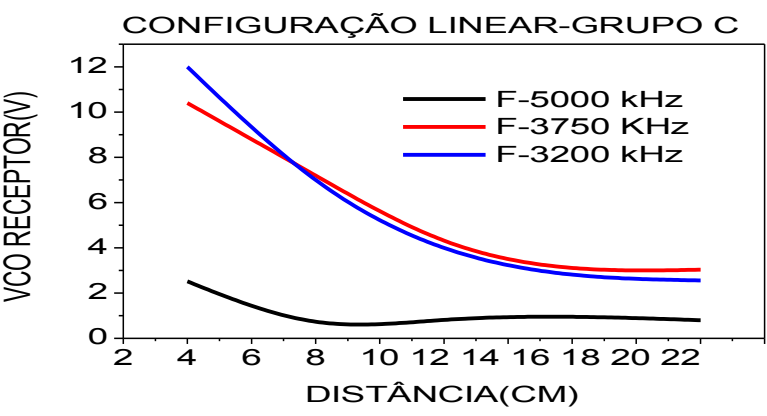


Figura. 48

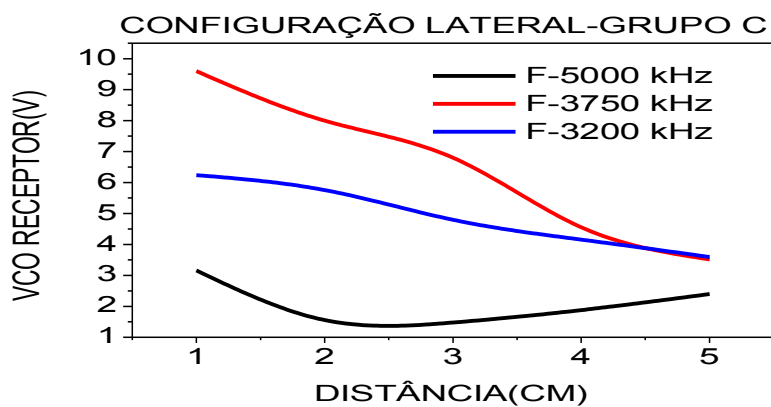


Figura. 49

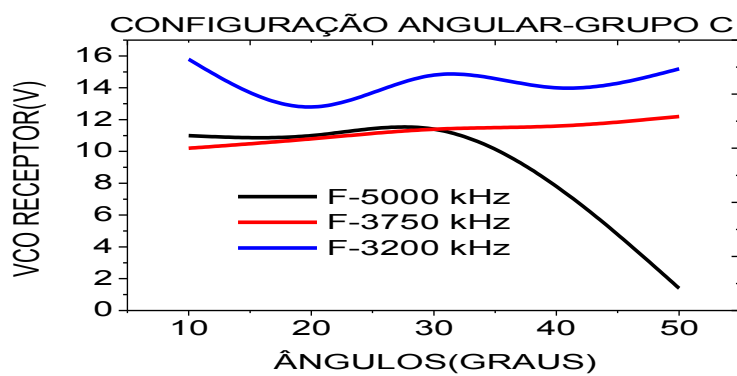


Figura. 50

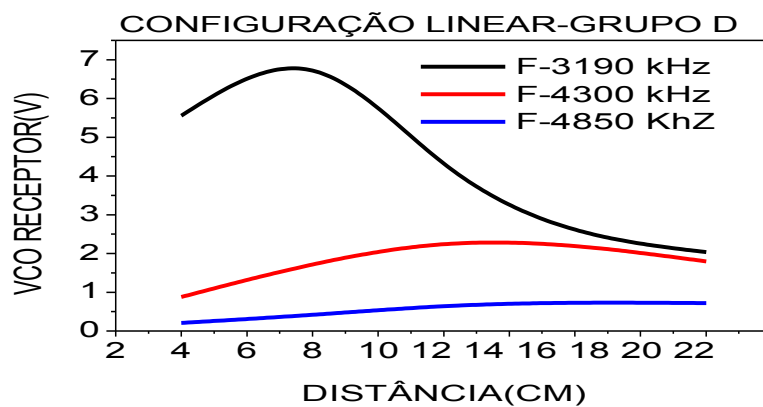


Figura. 51

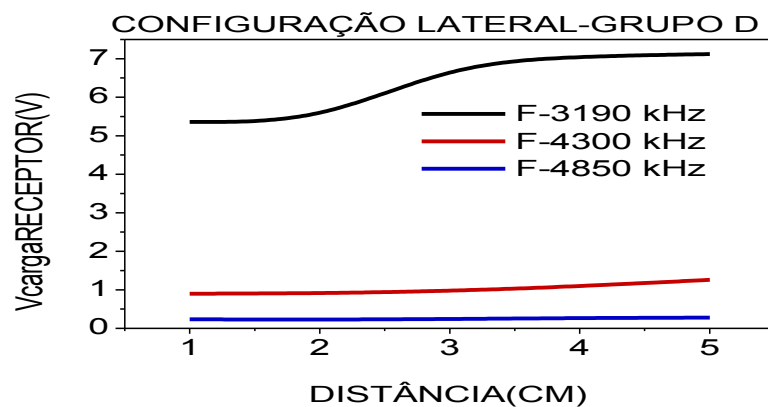
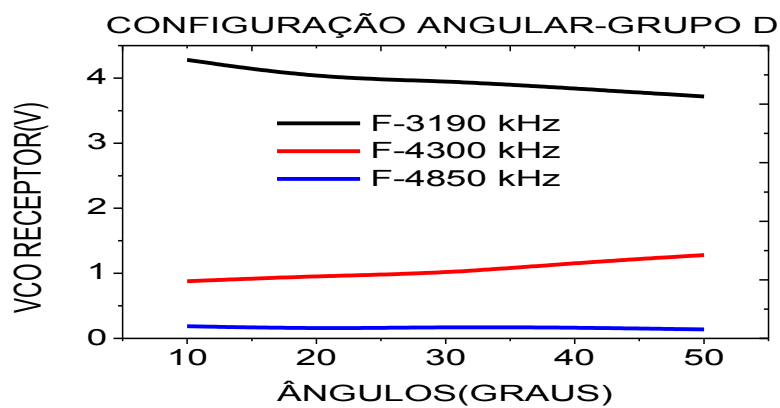


Figura. 52



GRUPO A

Figura. 53

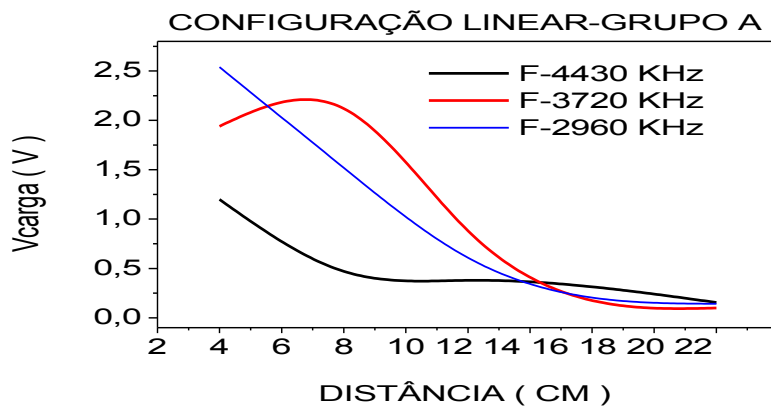


Figura. 54

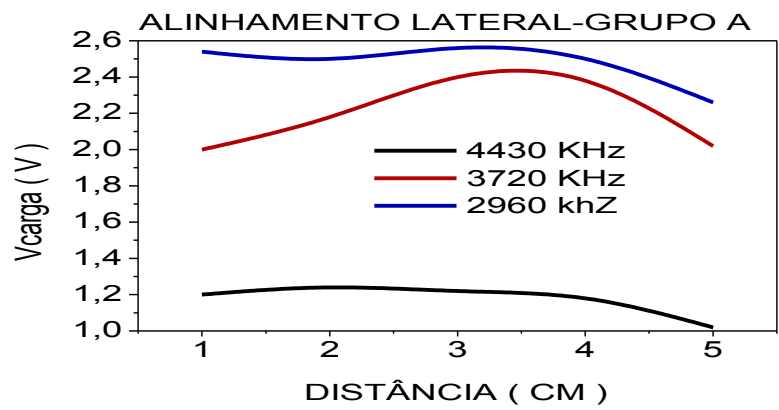
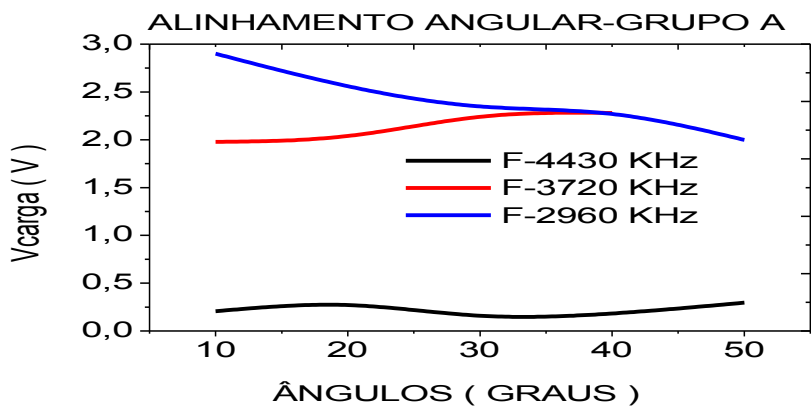
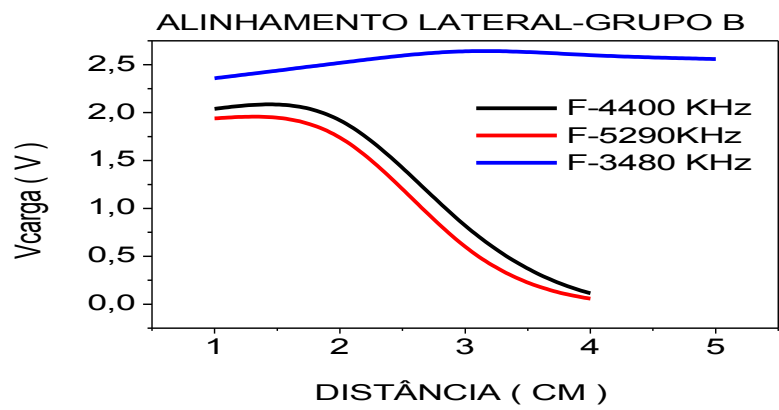


Figura. 55



GRUPO B

Figura. 56



GRUPO C

Figura. 57

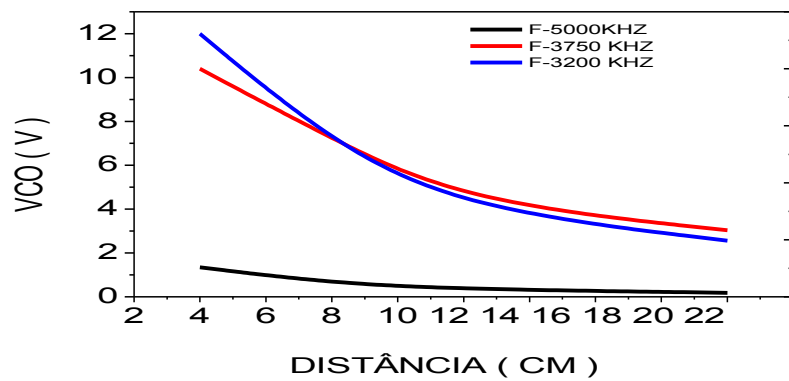


Figura. 58

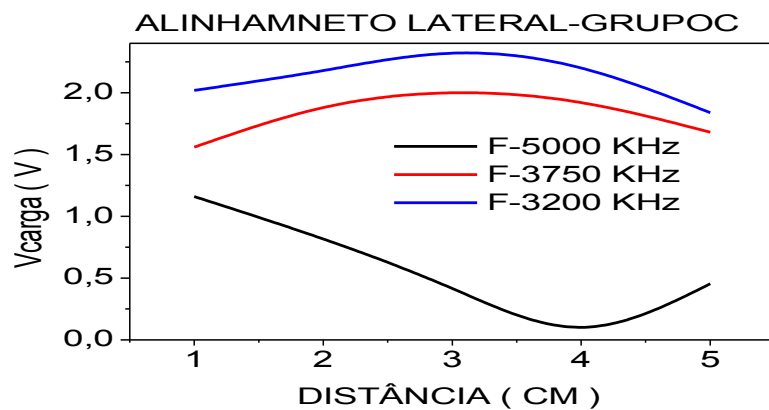
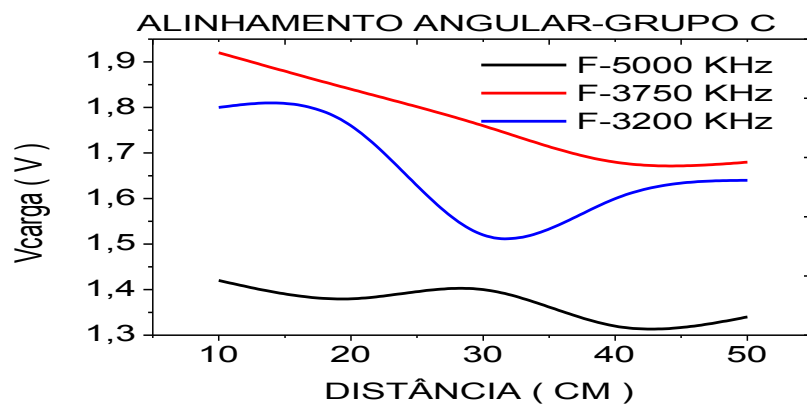


Figura. 59



GRUPO D

Figura. 60

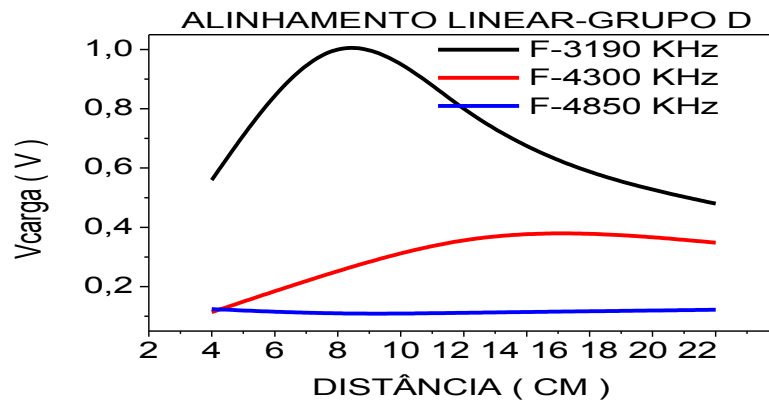


Figura. 61

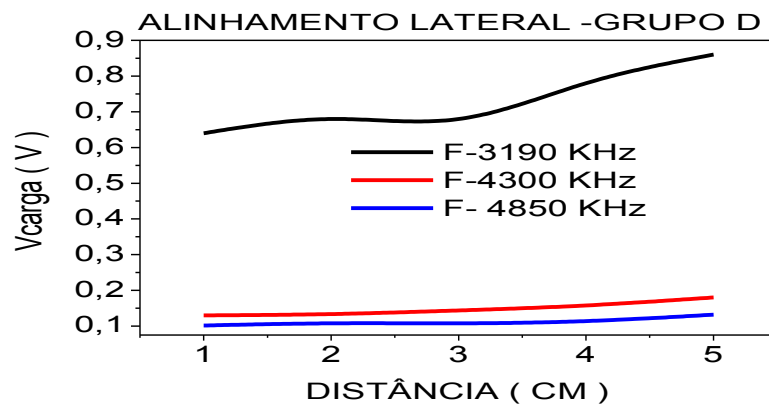
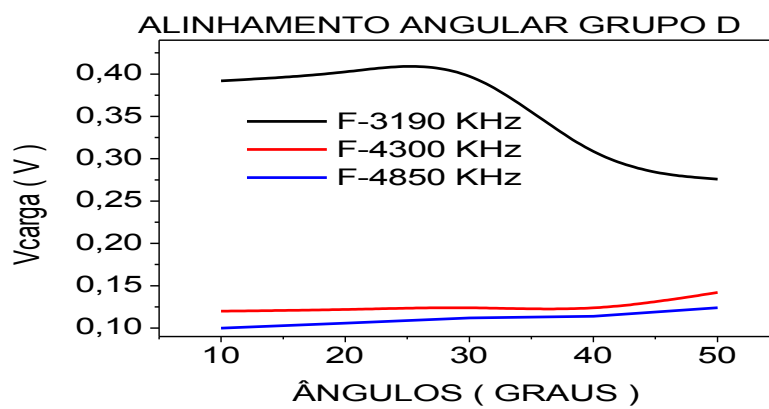


Figura. 62



4.11 Discussão dos resultados

Os ressoadores RLC foram estudados em frequências e configurações diferentes (linear lateral e angular). Apresentaram comprimentos de onda sempre maiores que os comprimentos físicos dos mesmos, caracterizando uma semelhança com antenas de quadro. Com circuito fechado no lado receptor realizamos as medições para tensões na carga, e com circuito aberto, realizamos as medições de tensão de circuito aberto.

Todos os conjuntos apresentaram resistências de perdas e radiação pequenas, assim como as indutâncias mútuas; Neste trabalho a frequência de ressonância de todos os conjuntos foi sempre inferior a 6 MHz. Por possuírem indutância alta, os conjuntos apresentaram correntes pequenas. Os conjuntos, em média, apresentaram baixa eficiência de transmissão, característica a nosso ver devido às limitações de potencia e corrente do aparato experimental, uma vez que a eficiência está relacionada as potências de transmissão. Nas tabelas relativas a eficiências (páginas 54 a 57), podemos observar os valores das mesmas, as quais tiveram variações percentuais da seguinte maneira: bobina tipo A (capacitor-56pF, f-2960 kHz,), eficiência variou entre 0,09% a 42,93%%; bobina tipo B (capacitor-33pF, f-4440 kHz,), eficiência variou entre 0,08% a 73,47%; bobina tipo C (capacitor-33pF, f-3200 kHz,), eficiência variou entre 14,42% a 53,90%; e bobina tipo D (capacitor-1pF, f-4850 kHz, d), a eficiência variou entre 0,01% a 0,05%.

As curvas das impedâncias vs. a frequência (resposta em frequência) indicam frequências de ressonâncias que validam o experimento, uma vez que seus valores teóricos e experimentais estão sempre próximos.

Os valores de **B**, e de M (indutância mútua), apresentam valores teóricos e experimentais próximos, bem como os valores das tensões de circuito aberto teóricos e experimentais. Este resultado valida a nosso ver, o modelo RLC como uma aproximação razoável dos fenômenos de acoplamento magnético forte entre ressoadores elétricos em RF.

CAPÍTULO 5

CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

Neste experimento foi estudado o acoplamento magnético forte entre ressoadores elétricos. Foi realizado um estudo da bibliografia existente, e um grande número de experimentos relacionados com a transmissão de um sinal entre ressoadores acoplados pelo campo próximo. Embora as limitações de potência do equipamento utilizado não possam ser ignoradas, os resultados obtidos indicam a possibilidade de serem utilizados indicadores de um projeto de transmissão de energia sem fios (“Witricity”), pois a base física e de engenharia foi utilizada com sucesso em nossos experimentos e análise. No estudo, o que se procurou mostrar foi que quando dois conjuntos de bobinas estão em ressonância, haverá transferência de energia do transmissor para o receptor, mesmo que entre eles existam configurações diferentes. A apresentação desses resultados, que constituem um dos objetivos do trabalho, está no apêndice.

Referências bibliográficas

[1] André Kurs et al. Wireless Power Transfer via Strongly Coupled Magnetic Resonances Science 317, 83 (2007); DOI: 10.1126/science.1143254.

[2] S. Pu, H. T. Hui ; To Improve Wireless Power Transmission Efficiency by Using Coil Arrays , WPT- 2013- conference- IEEE DOI: 10.1109/WPT 2013.6556916

[3] M.Yasir, S. Haque- The Witricity: Revolution in Power Transmission Technology-International Journal of Scientific & Engineering Research, Volume 4, Issue 8, August 2013.

[4] M. Kiani, M. Ghovanloo, The Circuit Theory Behind Coupled-Mode Magnetic Resonance-Based Wireless Power Transmission, IEEE transactions on circuits and systems, vol.59 2012 DOI:10.1109/TCSI 2011.2180446

[5] O. Jonah, M. Tentzeris , Wireless Power Transfer to Mobile Wearable Device via Resonance Magnetic” Wireless and Microwave Technology 14th Annual Conference 2013 IEEE

[6] F. Zhang, S. A. Hackworth, X. Liu, H. Chen, R. J. Sclabassi, and M. Sun, Wireless Energy Transfer Platform for Medical Sensors and Implantable Devices. 2009 Annual international conference of the IEEE engineering in medicine and biology society DOI: 10.1109/IEMBS.2009.5334790

- [7] N. Yin, G.Xu, Q. Yang, J. Zhao , X. Yang , J. Jin, Analysis of Wireless Energy Transmission for Implantable Device Based on Coupled Magnetic Resonance. IEEE transactions on magnetic, vol.48 2012 DOI: 10.1109/TMAG 2011.2174341
- [8] O. Jonah, S. V. Georgakopoulos, Wireless Power Transfer in Concrete via Strongly Coupled Magnetic Resonance – IEEE Transactions on Antennas and Propagation , Vol. 61, No 3, march 2013
- [9] Y. Yao, H. Zhang, Z. Geng Key, Laboratory Wireless Charger Prototype Based on Strong Coupled Magnetic Resonance Institute of Automation, CAS Beijing 100190, China
- [10] T. Imura, H. Okabe, Y. Hori, Basic Experimental Study on Helical Antennas of Wireless Power Transfer for Electric Vehicles by using Magnetic Resonant Couplings (-978-1-4244-2601-0/09)
- [11] Hackworth S.A., Liu X. Li C. Sun M. “Wireless Solar Energy to Homes: A Magnetic Resonance Approach” . International journal of innovations in energy and power, vol.5, p.40, 2010.
- [12] M. H. M. Salleh, N. Seman and J. Din The Investigation of Lateral and Angular Misalignments in the New Witricity Proceedings of ISAP 2014, Kaohsiung, Taiwan, Dec. 2-5, 2014
- [13] J. Wang , J. Li , S. L. Ho , W. N. Fu , Y. Li , H. Yu , and M. Sun Lateral and Angular Misalignments Analysis of a New PCB Circular Spiral Resonant Wireless Charger IEEE transactions on Magnetics, 2012 . DOI: 10.1109/TMAG.2012.2196980
- [14] S. L.Ho, W.N. Fu, and M. Sun , J. Wang , Design Study of a Novel Witricity Charger With Lateral and Angular Misalignments for Efficient Wireless Energy Transmission , Analytical IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS, VOL. 47, NO. 10, OCTOBER 2011-0018-9464/2011 IEEE

[15] J. Wang S. L.Ho, W.N. Fu, and M. Sun Analytical Design Study of a Novel Witricity Charger With Lateral and Angular Misalignments for 80 Efficient Wireless Energy Transmission IEEE Transactions on Magnetics DOI: 10.1109/TMAG.2011.2151253

[16] F. Zhang , S. Hackworth, F. Weinong, M. Sun, The relay effects on wireless power transfer using Witricity , 2010, 14th Biennual Conference on Eletromagnetic Field Computation , DOI: 10.1109/CEFC.2010.5481512

[17] Griffiths, D. J. Eletrodinâmica 3a Ed. – São Paulo, Editora Pearson Addison Wesley, 2011, 402 p. ISBN 978-85-7605-886-1

[18] Serway R. A. – **Physics for Scientists and Engineers-** 6th Ed New York ISBN 0-471-62194-3

[19] Balanis C. A., **Advanced Engineering Eletromagnetics** Editora John Wiley & Sons. Ano 1989. 981 pgs. ISBN 0-471-62194-3

[20] Pozar David M. , **Microwave Engineering-**4ª edição ISBN 978-0-470-63155-3

[21] Balanis C. A., **Antenna Theory: Analysis and design** 2a. Ed. ISBN 0-471-59268-4

[22] Internet– Condigital , w.w.w.passo-a- passo.com .

[23] Lahti B.P - **Sinais e sistemas lineares** , 2ª Edição Artmed Ed. S.A. Porto Alegre RS ISBN 0-19-515833-4, 2004, 854 pg.

[24] Abreu R.L.– **Projeto e desenvolvimento de dispositivo para transmissão de energia elétrica sem fios**. Itajubá: Universidade Federal de Itajubá, 2012. Dissertação Mestrado (Engenharia Elétrica)

APÊNDICE

MEDIDAS DAS TENSÕES DE CIRCUITO ABERTO E NA CARGA DE
TODOS OS GRUPOS

CONFIGURAÇÃO LINEAR GRUPO A

Tabela.26

MEDIDAS DAS TENSÕES DE CIRCUITO ABERTO E NA CARGA			
Distância (cm)	VCO (V)	Vcarga (V)	Frequência (kHz)
4	15,6	1,20	4430
8	7,6	0,47	
12	1,12	0,38	
20	0,70	0,15	

Tabela. 27

MEDIDAS DAS TENSÕES DE CIRCUITO ABERTO E NA CARGA			
Distância (cm)	VCO (V)	Vcarga (V)	Frequência (kHz)
4	12,6	1,94	3720
8	3,6	2,12	
12	1,2	0,880	
20	0,240	0,1	

Tabela. 28

MEDIDAS DAS TENSÕES DE CIRCUITO ABERTO E NA CARGA			
Distância (cm)	VCO (V)	Vcarga (V)	Frequência (kHz)
4	8,08	2,54	2960
8	2,36	2,50	
12	1,18	2,56	
20	0,232	2,50	

CONFIGURAÇÃO LATERAL GRUPO A

Tabela. 29

MEDIDAS DAS TENSÕES DE CIRCUITO ABERTO E NA CARGA			
Distância (cm)	VCO (V)	Vcarga (V)	Frequência (kHz)
1	13,8	1,2	4430
2	12,20	1,24	
3	10,20	1,22	
4	6,80	1,18	
5	2,80	1,02	

Tabela. 30

MEDIDAS DAS TENSÕES DE CIRCUITO ABERTO E NA CARGA			
Distância (cm)	VCO (V)	Vcarga(V)	Frequência (kHz)
1	12,8	2,0	3720
2	11,6	2,18	
3	10,0	2,40	
4	8,0	2,38	
5	5,6	2,02	

Tabela. 31

MEDIDAS DAS TENSÕES DE CIRCUITO ABERTO E NA CARGA			
Distância (cm)	VCO (V)	Vcarga (V)	Frequência (kHz)
1	9,92	2,54	2960
2	9,28	2,50	
3	7,12	2,56	
4	5,84	2,50	
5	4,48	2,26	

CONFIGURAÇÃO ANGULAR- GRUPO A

Tabela.32

MEDIDAS DAS TENSÕES DE CIRCUITO ABERTO E NA CARGA			
Ângulo (graus)	VCO (V)	Vcarga (V)	Frequência (kHz)
10	16,00	0,208	4430
20	15,80	0,272	
30	15,60	0,160	
40	15,40	0,184	
50	14,40	0,296	

Tabela. 33

MEDIDAS DAS TENSÕES DE CIRCUITO ABERTO E NA CARGA			
Ângulo (graus)	VCO (V)	Vcarga (V)	Frequência (kHz)
10	12,6	1,98	3720
20	11,00	2,04	
30	7,80	2,24	
40	5,60	2,28	
50	5,20	-	

Tabela. 34

MEDIDAS DAS TENSÕES DE CIRCUITO ABERTO E NA CARGA			
Ângulos (graus)	VCO (V)	Vcarga(V)	Frequência (kHz)
10	8,88	2,36	2960
20	9,20	2,44	
30	9,52	2,40	
40	9,84	2,36	
50	11,00	2,44	

CONFIGURAÇÃO LINEAR-GRUPO B

Tabela.35

MEDIDAS DAS TENSÕES DE CIRCUITO ABERTO E NA CARGA			
Distância (cm)	VCO (V)	Vcarga (V)	Frequência (kHz)
04	12,50	2,04	4400
08	3,92	1,92	
12	1,52	0,82	
20	0,20	0,11	

Tabela. 36

MEDIDAS DAS TENSÕES DE CIRCUITO ABERTO E NA CARGA			
Distância (cm)	VCO(V)	Vcarga(V)	Frequência (kHz)
04	11,80	1,94	5290
08	4,56	1,74	
12	1,34	0,60	
20	0,10	0,05	

Tabela. 37

MEDIDAS DAS TENSÕES DE CIRCUITO ABERTO E NA CARGA			
Distância (cm)	VCO (V)	Vcarga(V)	Frequência (kHz)
04	12,2	2,32	3480
08	3,36	0,20	
12	1,24	0,92	
20	0,23	0,18	

CONFIGURAÇÃO LATERAL-GRUPO B

Tabela.38

MEDIDAS DAS TENSÕES DE CIRCUITO ABERTO E NA CARGA			
Distância (cm)	VCO (V)	Vcarga (V)	Frequência (kHz)
1	11,90	2,12	4400
2	10,60	2,28	
3	8,40	2,40	
4	6,08	2,28	
5	5,04	1,88	

Tabela. 39

MEDIDAS DAS TENSÕES DE CIRCUITO ABERTO E NA CARGA			
Distância (cm)	VCO(V)	Vcarga(V)	Frequência (kHz)
1	11,60	1,68	5290
2	10,60	1,76	
3	8,20	2,06	
4	5,40	2,10	
5	3,40	1,34	

Tabela. 40

MEDIDAS DAS TENSÕES DE CIRCUITO ABERTO E NA CARGA			
Distância (cm)	VCO (V)	Vcarga(V)	Frequência (kHz)
1	11,70	2,36	3480
2	10,10	2,52	
3	8,24	2,64	
4	5,12	2,60	
5	3,68	2,56	

CONFIGURAÇÃO ANGULAR – GRUPO B

Tabela.41

MEDIDAS DAS TENSÕES DE CIRCUITO ABERTO E NA CARGA			
Ângulos (graus)	VCO (V)	Vcarga(V)	Frequência (kHz)
10	13,80	2,10	4400
20	13,80	2,04	
30	14,00	2,04	
40	13,80	2,10	
50	13,40	2,30	

Tabela.42

MEDIDAS DAS TENSÕES DE CIRCUITO ABERTO E NA CARGA			
Ângulos (graus)	VCO (V)	Vcarga(V)	Frequência (kHz)
10	10,80	1,70	5290
20	10,80	1,88	
30	10,50	1,84	
40	7,92	1,88	
50	8,00	2,02	

Tabela.43

MEDIDAS DAS TENSÕES DE CIRCUITO ABERTO E NA CARGA			
Ângulos (graus)	VCO (V)	Vcarga(V)	Frequência (kHz)
10	11,20	2,24	3480
20	11,40	2,40	
30	9,40	2,32	
40	10,20	2,28	
50	11,40	2,32	

CONFIGURAÇÃO LINEAR – GRUPO C

Tabela.44

MEDIDAS DAS TENSÕES DE CIRCUITO ABERTO E NA CARGA			
Distância (cm)	VCO (V)	Vcarga (V)	Frequência (kHz)
04	2,52	1,20	5000
08	0,74	0,08	
12	0,81	0,27	
20	0,80	0,25	

Tabela. 45

MEDIDAS DAS TENSÕES DE CIRCUITO ABERTO E NA CARGA			
Distância (cm)	VCO (V)	Vcarga(V)	Frequência (kHz)
04	10,40	1,96	3750
08	7,20	1,88	
12	4,32	1,44	
20	3,04	1,12	

Tabela. 46

MEDIDAS DAS TENSÕES DE CIRCUITO ABERTO E NA CARGA			
Distância (cm)	VCO (V)	Vcarga(V)	Frequência (kHz)
04	12,00	1,84	3200
08	7,00	2,32	
12	4,00	1,68	
20	2,56	1,20	

CONFIGURAÇÃO LATERAL – GRUPO C

Tabela.47

MEDIDAS DAS TENSÕES DE CIRCUITO ABERTO E NA CARGA			
Distância (cm)	VCO (V)	Vcarga (V)	Frequência (kHz)
1	3,16	1,16	5000
2	1,56	0,81	
3	1,48	0,41	
4	1,88	0,10	
5	2,40	0,45	

Tabela. 48

MEDIDAS DAS TENSÕES DE CIRCUITO ABERTO E NA CARGA			
Distância (cm)	VCO(V)	Vcarga(V)	Frequência (kHz)
1	9,60	1,56	3750
2	8,00	1,88	
3	6,80	2,00	
4	4,56	1,92	
5	3,52	1,68	

Tabela. 49

MEDIDAS DAS TENSÕES DE CIRCUITO ABERTO E NA CARGA			
Distância (cm)	VCO (V)	Vcarga (V)	Frequência (kHz)
1	6,24	2,32	3200
2	5,76	2,24	
3	4,80	2,08	
4	4,16	1,88	
5	3,60	1,60	

CONFIGURAÇÃO ANGULAR-GRUPO C

Tabela.50

MEDIDAS DAS TENSÕES DE CIRCUITO ABERTO E NA CARGA			
Ângulos (graus)	VCO (V)	Vcarga(V)	Frequência (kHz)
10	11,00	1,42	5000
20	11,00	1,38	
30	11,40	1,40	
40	7,80	1,32	
50	1,40	1,34	

Tabela.51

MEDIDAS DAS TENSÕES DE CIRCUITO ABERTO E NA CARGA			
GRUPO C-DESALINHAMENTO ANGULAR			
Ângulos (graus)	VCO (V)	Vcarga (V)	Frequência (kHz)
10	10,20	1,92	3750
20	10,80	1,84	
30	11,40	1,76	
40	11,60	1,68	
50	12,20	1,68	

Tabela.52

MEDIDAS DAS TENSÕES DE CIRCUITO ABERTO E NA CARGA			
Ângulos (graus)	VCO (V)	Vcarga(V)	Frequência (kHz)
10	15,8	1,80	3200
20	12,8	1,76	
30	14,8	1,52	
40	14,00	1,60	
50	15,2	1,64	

CONFIGURAÇÃO LINEAR – GRUPO D

Tabela.53

MEDIDAS DAS TENSÕES DE CIRCUITO ABERTO E NA CARGA			
Distância (cm)	VCO (V)	Vcarga (V)	Frequência (Khz)
04	5,56	0,56	3190
08	6,72	1,0	
12	4,32	0,8	
20	2,04	0,48	

Tabela.54

MEDIDAS DAS TENSÕES DE CIRCUITO ABERTO E NA CARGA			
Distância (cm)	VCO (V)	Vcarga (V)	Frequência (kHz)
04	0,88	0,11	4300
08	1,72	0,25	
12	2,24	0,35	
20	1,80	0,34	

Tabela.55

MEDIDAS DAS TENSÕES DE CIRCUITO ABERTO E NA CARGA			
Distância (cm)	VCO (V)	Vcarga (V)	Frequência (kHz)
04	0,21	0,12	4850
08	0,42	0,11	
12	0,64	0,11	
20	0,72	0,12	

CONFIGURAÇÃO LATERAL – GRUPO D

Tabela.56

MEDIDAS DAS TENSÕES DE CIRCUITO ABERTO E NA CARGA			
Distância (cm)	VCO (V)	Vcarga (V)	Frequência (kHz)
1	5,36	0,64	3190
2	5,6	0,68	
3	6,64	0,68	
4	7,04	0,78	
5	7,12	0,86	

Tabela.57

MEDIDAS DAS TENSÕES DE CIRCUITO ABERTO E NA CARGA			
Distância (cm)	VCO (V)	Vcarga (V)	Frequência (kHz)
1	0,90	0,13	4300
2	0,92	0,13	
3	0,98	0,14	
4	1,10	0,15	
5	1,26	0,18	

Tabela.58

MEDIDAS DAS TENSÕES DE CIRCUITO ABERTO E NA CARGA			
Distância (cm)	VCO (V)	Vcarga (V)	Frequência (kHz)
1	0,23	0,10	4850
2	0,23	0,10	
3	0,24	0,10	
4	0,26	0,11	
5	0,27	0,13	

CONFIGURAÇÃO ANGULAR – GRUPO D

Tabela.59

MEDIDAS DAS TENSÕES DE CIRCUITO ABERTO E NA CARGA			
Ângulos (graus)	VCO (V)	Vcarga(V)	Frequência (kHz)
10	4,28	0,39	3190
20	4,00	0,40	
30	3,96	0,42	
40	3,84	0,28	
50	3,72	0,27	

Tabela.60

MEDIDAS DAS TENSÕES DE CIRCUITO ABERTO E NA CARGA			
Ângulos (graus)	VCO (V)	Vcarga(V)	Frequência (kHz)
10	0,88	0,12	4300
20	0,96	0,12	
30	1,0	0,12	
40	1,16	0,12	
50	1,28	0,14	

Tabela.61

MEDIDAS DAS TENSÕES DE CIRCUITO ABERTO E NA CARGA			
Ângulos (graus)	VCO (V)	Vcarga(V)	Frequência (kHz)
10	0,18	0,10	4850
20	0,14	0,10	
30	0,17	0,11	
40	0,16	0,11	
50	0,14	0,12	