

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
CAMPUS MEDIANEIRA  
CURSO SUPERIOR DE TECNOLOGIA EM MANUTENÇÃO INDUSTRIAL**

**ÂNGELO AURÉLIO GNOATTO**

**CONSTRUÇÃO DE UM CAPACITOR DIDÁTICO VARIÁVEL DE  
LÂMINAS PARALELAS**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

**MEDIANEIRA**

**2013**

**ÂNGELO AURÉLIO GNOATTO**

**CONSTRUÇÃO DE UM CAPACITOR DIDÁTICO VARIÁVEL DE  
LÂMINAS PARALELAS**

Trabalho de Conclusão de curso  
apresentado como requisito parcial à  
obtenção do título de Tecnólogo em  
Manutenção Industrial, da Universidade  
Tecnológica Federal do Paraná – Câmpus  
Medianeira

Orientador: Prof. Me. Estor Gnoatto

**MEDIANEIRA**

**2013**



Ministério Da Educação  
**Universidade Tecnológica Federal do Paraná**  
Câmpus Medianeira  
Diretoria de Graduação e Educação Profissional  
Curso Superior de Tecnologia em Manutenção  
Industrial



---

---

## TERMO DE APROVAÇÃO

### CONSTRUÇÃO DE UM CAPACITOR DIDÁTICO VARIÁVEL DE LÂMINAS PARALELAS

Por:

**ÂNGELO AURÉLIO GNOATTO**

Este Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) foi apresentado as 19:30 h do dia 12 de Abril de 2013 como requisito parcial para obtenção do título de Tecnólogo em Manutenção Industrial, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Câmpus Medianeira. O acadêmico foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

---

Prof. Me. Estor Gnoatto

UTFPR – *Câmpus* Medianeira  
(Orientador)

---

Prof. Dr. Marcos Fischborn

UTFPR – *Câmpus* Medianeira  
(Convidado)

---

Prof. Me. Yuri Ferruzzi

UTFPR – *Câmpus* Medianeira  
(Convidado)

---

Prof. Yuri Ferruzzi

UTFPR – *Câmpus* Medianeira  
(Responsável pelas atividades de TCC)

- O Termo de Aprovação assinado encontra-se na Coordenação do Curso de Tecnologia em Manutenção Industrial

Dedico esse trabalho à minha família, pelo otimismo, incentivo e apoio, quando da realização desse curso.

## **AGRADECIMENTOS**

A todos os familiares, parentes e amigos pelo apoio prestado quando da realização desta caminhada.

Ao Professor Yuri Ferruzzi pelo apoio prestado durante as etapas de execução desse projeto.

A Universidade Tecnológica Federal do Paraná por tornar possível a realização deste curso.

A todos os professores pelos conhecimentos transmitidos ao longo desta jornada.

A todos que de alguma forma colaboraram para a realização e finalização deste trabalho.

*“para cada pé torto sempre tem um calçado que dá certo”.*  
*(autor desconhecido)*

## RESUMO

GNOATTO, Ângelo Aurélio. Construção de um capacitor didático variável de lâminas paralelas. 2013. 66f. Trabalho de Conclusão de Curso (Tecnologia em Manutenção Industrial) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Medianeira, 2013.

Este trabalho consiste no projeto e construção de um capacitor didático variável de lâminas paralelas com capacitância de 7000 microfarads ( $\mu\text{F}$ ), para ser utilizado nas atividades práticas de laboratório das disciplinas dos cursos da UTFPR - Câmpus Medianeira PR. Tendo como objetivos específicos o projeto, construção e a determinação dos seus parâmetros dielétricos. O projeto de dimensionamento do capacitor variável foi desenvolvido através do uso de software *Solidworks*<sup>®</sup>. A confecção e montagem do capacitor em quase sua totalidade foi executada nos laboratórios do Curso Superior de Tecnologia em Manutenção Industrial da UTFPR – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Câmpus de Medianeira – PR. Para determinação dos parâmetros foram realizados testes de capacitância, nível de tensão, transitórios, resposta de frequência, curva de carga e descarga, fator de potência, comportamento do capacitor em AC em circuito RLC série e paralelo, impedância e ângulo de defasamento. Sendo que nos ensaios o capacitor respondeu satisfatoriamente, desta forma adequado para ser utilizado em ensaios elétricos didáticos.

**Palavras-chave:** reatância capacitiva, fator de potência, ensaios elétricos.

## ABSTRACT

GNOATTO, Ângelo Aurélio Construction of a didactic capacitor variable parallel blades. 2013. 66f. Completion of course work (Industrial Maintenance Technology) - Federal Technological University of Paraná. Medianeira. 2013.

This work consists of the design and construction of a variable capacitor didactic blades with parallel capacitance of 7000 microfarads (mF), to be used in the practical activities of the disciplines of laboratory courses UTFPR - Campus Medianeira - PR. Having specific goals as the design, construction and determination of their dielectric parameters. The project sizing variable capacitor was developed through the use of Solidworks® software. The manufacturing and assembly of the capacitor was almost entirely performed in the laboratories of the Course of Technology in Industrial Maintenance UTFPR - Federal Technological University of Paraná, Campus of Medianeira - PR. To determine the parameters Tests of capacitance, voltage level, transient, frequency response curve, loading and unloading, power factor capacitor behavior in AC RLC circuit in series and parallel impedance and phase shift angle. Since the capacitor assays responded satisfactorily in this way suitable for use in testing electric didactic.

**Keywords:** Capacitive Reactance, Power factor, Electrical tests.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Capacitor de placas planas paralelas .....	15
Figura 2 - Capacitores associados em paralelo .....	17
Figura 3 – Capacitor com placas paralelas. ....	18
Figura 4 – Capacitores associados em série.....	19
Figura 5 – Arranjos mais comuns de capacitores.....	21
Figura 6 – capacitores variáveis.....	22
Figura 7 – Capacitores plásticos .....	23
Figura 8 – Capacitores cerâmicos.....	23
Figura 9 – Capacitor eletrolítico com terminais de saída axial e radial.....	24
Figura 10 – Medida de utilização de defasagem entre dois sinais. ....	25
Figura 11 – Composição de 2 sinais defasados e a elipse resultante.....	27
Figura 12 – Medida da fase entre duas ondas .....	27
Figura 13 – Medida de frequência usando figura de lissajous. ....	28
Figura 14 – Figuras de lissajous frequência x fase entre os dois movimentos perpendiculares.....	30
Figura 15 – Capacitor variável em 3D .....	32
Figura 16 – Capacitor variável vista explodida em 3D .....	33
Figura 17 – Conjunto placas fixas (estator).....	34
Figura 18 – Placa fixa da armadura .....	34
Figura 19 – Placa isolante (dielétrico) .....	35
Figura 20 – Conjunto placas móveis (armadura móvel) .....	36
Figura 21 – Placa móvel da armadura .....	36
Figura 22 – Eixo da armadura móvel .....	37
Figura 23 – Placa frontal do sistema de fixação.....	38
Figura 24 – Placa fundo do sistema de fixação.....	38
Figura 25 – Engrenagem secundária .....	39

Figura 26 – Conjunto engrenagem primária.....	40
Figura 27 – Medida de capacitância e fator de qualidade com capacitor fechado ....	41
Figura 28 – Medida de capacitância e fator de qualidade com capacitor aberto.....	41
Figura 29 – Passos para os testes. ....	43
Figura 30 – Teste isolamento .....	44
Figura 31 – Falha de isolamento com tensão de 2,5 kV.....	45
Figura 32 – Forma de onda do Transitório no momento de comutação .....	46
Figura 33 – Gerador de sinais ajustado para onda quadrada. ....	46
Figura 34 – Oscilações na onda quadrada.....	47
Figura 35 – Transitório de chaveamento do capacitor .....	48
Figura 36 – Resposta De Frequência a 100Hz E 200Hz.....	50
Figura 37 – Resposta De Frequência a 1KHz E 2KHz.....	50
Figura 38 – Resposta De Frequencia a 4,5KHz .....	51
Figura 39 – Esquema de montagem .....	52
Figura 40 – Capacitor 100% aberto .....	52
Figura 41 – Capacitor 75% aberto .....	52
Figura 42 – Capacitor 50% aberto .....	52
Figura 43 – Capacitor 25% aberto .....	52
Figura 46 – Capacitor fechado .....	54
Figura 47 – Capacitor 25% aberto.....	54
Figura 50 – Capacitor 100% aberto.....	54
Figura 51 – Circuito RLC.....	55
Figura 52 – Diagrama fasorial Circuito RLC.....	55
Figura 53 – Capacitor fechado .....	56
Figura 54 – Capacitor 25% aberto.....	56
Figura 57 – Capacitor 100% aberto.....	57
Figura 58 – Circuito Equivalente capacitor.....	58

Figura 59 – Diagrama fasorial .....	58
Figura 60 - Circuito de ensaio na tensão da rede elétrica .....	59
Figura 61 – Circuito RC .....	60
Figura 62– Defasagem das ondas .....	61
Figura 63 – Capacitor aberto 100% .....	61
Figura 66 – Capacitor aberto 25% .....	62
Figura 67 – Capacitor fechado .....	62

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

A	Ampéres
V	Volts
UES	Unidade eletrostática absoluta
mA	Miliampéres
mm	Milímetros
cm	Centímetros
Vca	Tensão Alternada
Vcc	Tensão Contínua
ms	Milisegundos
SI	Sistema Internacional de Unidades
mF	Milifarad
$\mu$ F	Microfarad
nF	Nanofarad

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>13</b>
<b>1.1 OBJETIVO GERAL .....</b>	<b>14</b>
<b>1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....</b>	<b>14</b>
<b>2 REVISÃO DE LITERATURA .....</b>	<b>15</b>
<b>3 MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>31</b>
3.1 CÁLCULO DO CAPACITOR VARIÁVEL .....	31
3.2 PROJETO E EXECUÇÃO DO CAPACITOR VARIÁVEL .....	32
3.3 CONFECÇÃO DAS PEÇAS E MONTAGEM DO CAPACITOR.....	33
3.3.1 Armadura Fixa.....	33
3.3.2 Armadura móvel.....	35
3.3.3 Estrutura de fixação .....	37
3.3.3.1 sistema de movimentação da armadura móvel (rotor).....	38
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	41
4.1 CAPACITÂNCIA E FATOR DE QUALIDADE.....	41
4.2 ENSAIO DE ISOLAÇÃO .....	42
4.3 TRANSIENTES EM CIRCUITOS RC.....	45
4.3.1 Avaliação do transitório do circuito RC Capacitor .....	46
4.4 RESPOSTA EM FREQUÊNCIA.....	49
4.5 CURVA DE CARGA E DESCARGA DO CAPACITOR .....	51
4.6 ANÁLISE DO FATOR DE POTÊNCIA .....	53
4.7 COMPORTAMENTO DO CAPACITOR EM AC EM CIRCUITO RLC SÉRIE. .	55
4.8 ENSAIO DE IMPEDÂNCIA .....	57
4.9 ÂNGULO DE DEFASAMENTO.....	60
<b>5 CONCLUSÃO .....</b>	<b>63</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>64</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Os capacitores são dispositivos facilmente encontrados em circuitos elétricos e eletrônicos. Eles são usados em motores elétricos, em sistemas de ignição de veículos, flashes eletrônicos, starts de lâmpadas fluorescentes, dentre outras aplicações.

Os capacitores variáveis são usados principalmente em circuitos de alta frequência tais como receptores de rádio, telecomunicações, televisores, transmissores e em muitos outros onde sinais de frequências acima de 100 kHz estão presentes e precisam ser ajustadas. Antigamente eram facilmente encontrados capacitores deste tipo com grandes capacidades foram sumindo do mercado junto com a evolução dos semicondutores, hoje em dia são encontrados quando fabricados de forma artesanal.

A construção deste capacitor tem a finalidade didática, para mostrar como é a estrutura de um capacitor, bem como a capacitância pode variar mudando uma de suas variáveis. Também poderá ser um utilizado em laboratório para experiências, como as realizadas neste trabalho, assim promovendo uma maior interação teoria e prática.

## **1.1 OBJETIVO GERAL**

A execução desse projeto tem por objetivo geral a construção de um capacitor didático variável para ser utilizado nas atividades práticas de laboratório das disciplinas dos cursos da UTFPR- Câmpus Medianeira.

## **1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

Este trabalho tem como objetivos específicos:

- Projetar e executar a construção de um capacitor didático variável.
- Determinar os parâmetros dielétricos do capacitor.

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1 CAPACITOR

O capacitor é um componente que tem como finalidade armazenar energia elétrica. Basicamente, um capacitor é formado por duas placas condutoras metálicas, as quais são denominadas “armaduras”, sendo elas separadas por um material isolante denominado “dielétrico”. Ligados as armaduras, estão os terminais para conexão deste com outros componentes, conforme mostra a figura 1. O dielétrico pode ser de papel, vidro, poliéster, mica, ar e mesmo o vácuo. Para muitos tipos de capacitores o dielétrico dá nome ao capacitor. Assim, um capacitor de poliéster tem este material plástico como isolante.

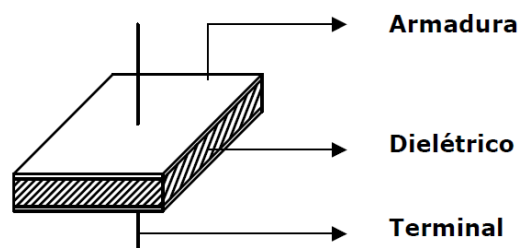


Figura 1 - Capacitor de placas planas paralelas

### 2.2 CAPACITÂNCIA

A Capacitância ( $C$ ) é a capacidade de acumulação de cargas elétricas no capacitor, quando aplicamos em seus terminais determinada tensão. Sua capacitância é determinada pelas dimensões das placas e pela distância de uma em relação à outra, ou seja, é diretamente proporcional à área das armaduras e inversamente proporcional à espessura do Dielétrico (MARTIGNONI, 1978).

Pelo Sistema Internacional de Unidades (SI), um capacitor tem a capacitância de um farad (F) quando um coulomb de carga causa uma diferença de potencial de um volt (V) entre as placas. O farad é uma unidade de medida considerada muito grande para circuitos práticos, por isso, são utilizados valores de capacitâncias expressos em microfarads ( $\mu\text{F}$ ), nanofarads (nF) ou picofarads (pF). A capacitância é dada pela equação 1



$$C = \frac{Q}{V} \quad (1)$$

Para um capacitor de placas paralelas a capacidade de armazenamento de cargas pode ser dada pela equação 2

$$C = \varepsilon \frac{A}{d} \quad (2)$$

Sendo:

$\varepsilon$  - Permissividade elétrica do meio material entre as placas (C/V.cm).

$d$  - Distância entre as placas do capacitor (cm).

$A$  - Área da placa (cm<sup>2</sup>).

No ar ou no vácuo a permissividade é constante e igual a  $\varepsilon = \varepsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12}$  C/V.m = 8,85 pF/m. Para materiais isolantes, também chamado de materiais dielétricos a permissividade é multiplicada pela constante dielétrica do material  $k$ , conforme mostra a equação 3.

$$\varepsilon = \varepsilon_0 k \quad (3)$$

A constante dielétrica  $k$  também é chamada permissividade relativa  $\varepsilon_r$ . A Tabela 1 apresenta a constante dielétrica e a rigidez dielétrica, que é a medida da tensão elétrica que um material isolante é capaz de suportar sem conduzir corrente, para diversos materiais isolantes.

**Tabela 1 - Constante dielétrica e a rigidez dielétrica dos materiais**

Material	Constante dielétrica "k"	Rigidez dielétrica (kV/mm)
Alumina Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (99,9%)	10,1	9,1
Alumina (99,5%)	9,8	9,5
Berília BeO (99,5%)	6,7	10,2
Cordierita	4,1 a 5,3	2,4 a 7,9
Nylon 66 reforçado com 33% de fibra de vidro (seco)	3,7	20,5
Nylon 66 reforçado com fibra de vidro (50% umidade)	7,8	17,3
Poliéster	3,6	21,7

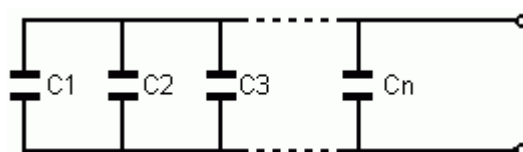
Fonte: HALLIDAY, 1993

### 2.3 AGRUPAMENTO DE CAPACITORES

Em situações onde é necessário capacitores com capacidade elevada é necessário recorrer ao agrupamento (associação) de capacitores, de modo a agrupar seus efeitos num circuito. Isso pode ser feito basicamente de duas formas: associação de capacitores em série e em paralelo (MARTIGNONI, 1978).

#### 2.3.1 Agrupamento De Capacitores Em Paralelo

O agrupamento em paralelo dos capacitores é o que possibilita a constituição de uma bateria que tem capacidade total igual a soma das capacidades dos vários capacitores componentes. Dizemos que dois ou mais capacitores estão associados em paralelo quando suas armaduras positivas são interligadas tal qual suas armaduras negativas. A figura 2 mostra a associação de capacitores em paralelo (MARTIGNONI, 1978).



**Figura 2 - Capacitores associados em paralelo**

A capacitância total de uma associação deste tipo depende da capacitância dos capacitores associados. É possível, neste caso, dizer que a capacitância equivalente a uma associação de capacitores em paralelo é igual à soma das capacitâncias dos capacitores associados. A equação 4 mostra a associação de capacitores em paralelo (MARTIGNONI, 1978).

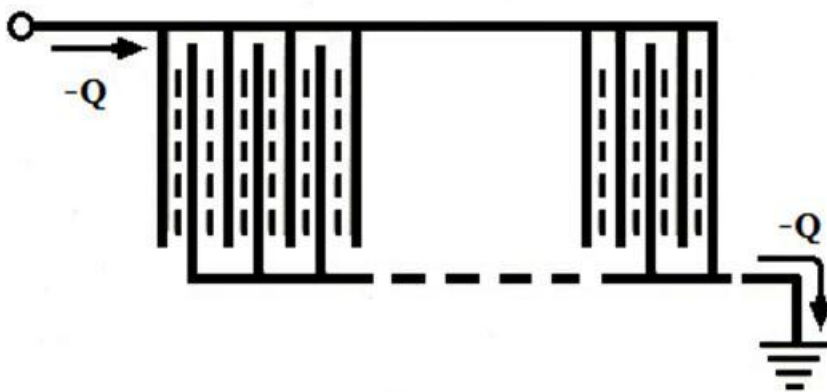
$$C = C_1 + C_2 + C_3 \dots C_n \quad (4)$$

Sendo:

$C$  = capacitância equivalente

$C_1, C_2, C_3 \dots C_n$  = Capacitância dos capacitores associados

Um caso particular do agrupamento em paralelo de capacitores de capacidades iguais é constituído pela figura 3, no qual cada placa metálica representa a armadura de dois condensadores adjacentes. A quantidade dos condensadores em paralelo é representada pelo número dos isoladores e, como cada um deles fica entre duas armaduras, o total deles será inferior de um ao número de armaduras. (MARTIGNONI, 1978).



**Figura 3 – Capacitor com placas paralelas.**

De acordo com Martignoni, (1978) a capacitância total do condensador é dada pela equação 5

$$C_T = \varepsilon \frac{(n-1)S}{4\pi d} \quad (5)$$

Sendo:

$C_T$  = Capacitância total (UES)

$\varepsilon$  = Permissividade elétrica do meio material entre as placas.

$n$  = Numero de armaduras do condensador.

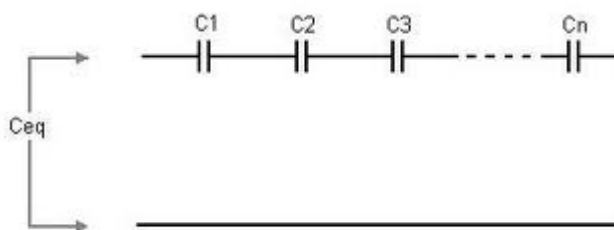
$S$  = Área em de uma das armaduras ( $\text{cm}^2$ ).

$d$  = Espessura do isolamento que separa as placas ( $\text{cm}^2$ ).

Segundo fowler,1992 para transformar UES em microfarads ( $\mu\text{F}$ ), devemos multiplicar por  $3^{-2} 10^5$ .

### 2.3.1 Agrupamento De Capacitores Em Série

O agrupamento de capacitores em série consiste em conectar metalicamente duas a duas. A armadura positiva do primeiro fica livre, tornando-se o terminal positivo da associação, a armadura negativa do primeiro é ligada à positiva do segundo, a negativa do segundo à positiva do terceiro e assim por diante até que, no último, a armadura negativa fica livre e se torna a armadura negativa da associação, A figura 4 mostra esse tipo de associação(MARTIGNONI, 1978).



**Figura 4 – Capacitores associados em série.**

A capacitância total apresentada pela associação dependerá dos valores de todos capacitores associados. O inverso da capacitância equivalente será igual à

soma dos inversos das capacitâncias associadas. As principais propriedades da associação de capacitores em série são que a capacitância equivalente é sempre menor do que o menor capacitor associado. Todos os capacitores ficam com a mesma carga e o maior capacitor fica submetido à menor tensão. A equação 6 mostra a associação de capacitores em série (MARTIGNONI, 1978).

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} + \dots + \frac{1}{C_n}. \quad (6)$$

Sendo:

$C$  = Capacitância equivalente

$C_1, C_2, C_3 \dots C_n$  = Capacitância dos capacitores associados

## 2.4 TIPOS DE CAPACITOR

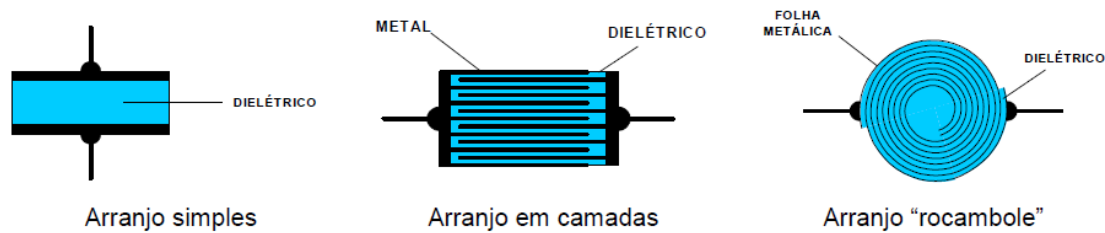
Há uma variedade muito grande de capacitores disponíveis no mercado e cada um tem seu próprio conjunto de características e aplicações. São encontrados em todos os equipamentos eletrônicos. Embora seu princípio de funcionamento seja muito simples, a maneira como os capacitores podem ser construídos varia bastante, o que nos leva a uma grande variedade de tipos. A finalidade básica de um capacitor é apresentar uma capacitância em um circuito, ou seja, armazenar cargas elétricas, e através desse armazenamento ter determinados efeitos sobre um circuito. Os capacitores também podem ser chamados de "condensadores".

Os capacitores se diferenciam tanto pela técnica de construção quanto pelos materiais. Essas diferenças dotam estes capacitores de propriedades específicas, que os tornam ideais para determinados tipos de aplicação. As diferenças entre os tipos de capacitor são geralmente feitas em relação ao dielétrico usado entre as placas.

Os capacitores comerciais são feitos de folha metálica entrelaçada com folhas finas de papel impregnadas em parafina, ou de poliéster que é o material dielétrico. Alguns capacitores parecem tubos, porque as placas de folha de metal são enroladas em um cilindro de modo a formar um pequeno pacote com o material dielétrico isolador ensanduichado entre elas. Pequenos condensadores são

frequentemente construídos a partir de materiais cerâmicos e em seguida mergulhados em uma resina epóxi para vedá-los.

Os capacitores podem ser fabricados em diferentes arranjos, utilizando diferentes tipos de materiais, o arranjo simples, o arranjo em camadas e o arranjo “rocambolé”. A figura 5 mostra estes tipos de arranjos.



**Figura 5 – Arranjos mais comuns de capacitores**

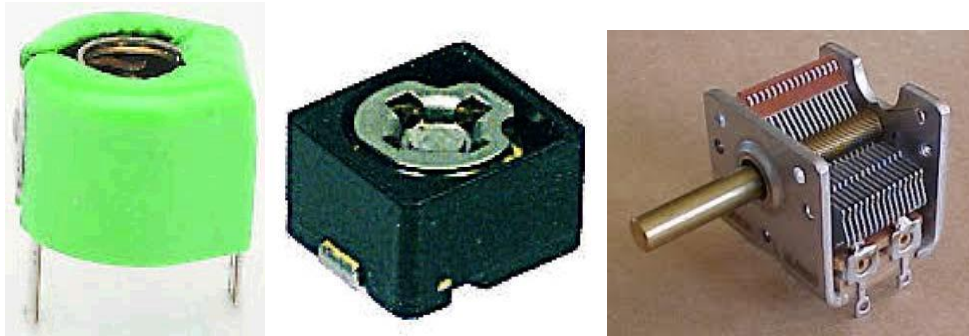
Dentre os diversos tipos temos: Capacitor dielétrico, capacitor de filme, capacitor de cerâmica e capacitor eletrolítico.

#### 2.4.1 Capacitor Dielétrico

Capacitores dielétricos são geralmente do tipo variável que tem uma variação contínua de capacitância. São normalmente encontrados em circuitos transmissores e receptores de RF (rádio frequência), para pequenos ajustes na calibração (capacitores ajustáveis), ou para mudança de sintonia de um rádio receptor de AM e FM, por exemplo.

Condensadores variáveis dielétricos têm um conjunto de placas fixas (as pás de estator) e um conjunto de placas móveis (as palhetas do rotor), que se movem entre as placas fixas. A posição das placas que se deslocam em relação às placas fixas determina o valor da capacitância total. O valor máximo de capacitância é quando os dois conjuntos de placas estão totalmente fechados. Capacitores de alta tensão de sintonização têm espaçamentos relativamente grandes de ar ou aberturas entre as placas com voltagens de degradação atingindo vários milhares de volts. Estes são geralmente pequenos dispositivos que podem ser ajustados, ou "pré-definido" a um valor de capacitância com a ajuda de uma pequena chave de parafusos e estão disponíveis em capacitâncias muito pequenas de 500pF ou menos e são não polarizadas, ou seja não possuem polos definidos.

A figura 6 mostra alguns tipos de capacitores ajustáveis.



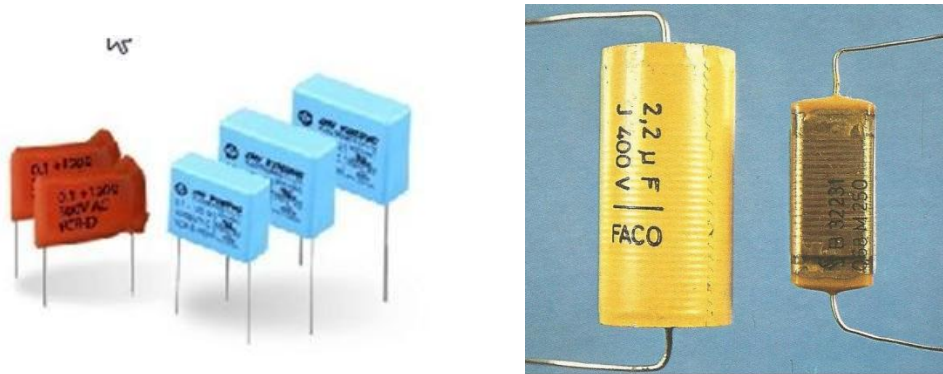
**Figura 6 – capacitores variáveis**

#### 2.4.2 - Capacitor de Filme

Consistem em duas folhas de alumínio separados pelo dielétrico de material plástico. Sendo os terminais ligados às folhas de alumínio. O conjunto é bobinado e encapsulado, formando um sistema compacto. Uma outra técnica construtiva é a de vaporizar alumínio em ambas as faces do dielétrico, formando o capacitor. Essa técnica é denominada metalização e traz como vantagem, maior capacidade de compactação comparando com os de mesmas dimensões dos não metalizados.

Capacitores de filme que usam poliestireno, poliéster, policarbonato ou Teflon como seus dielétricos são às vezes chamados "capacitores de plástico". A construção de condensadores de filme plástico é semelhante ao dos condensadores de película de papel, mas utilizam uma película de plástico, em vez de papel. A principal vantagem de condensadores de filme plástico em comparação com os tipos de papel impregnado é que eles operam bem sob condições de temperatura elevada, têm tolerâncias menores, uma vida útil longa e confiabilidade elevada.

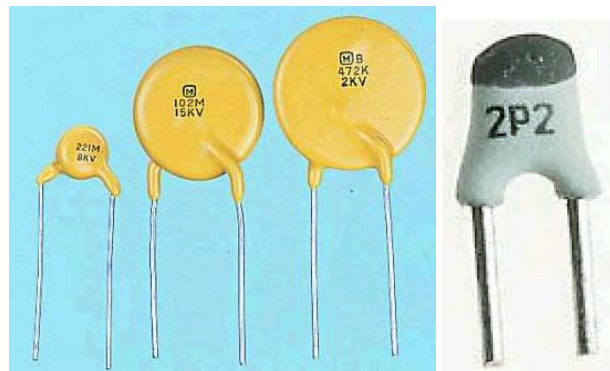
Alguns exemplos de capacitores filme são mostrados na figura 7.



**Figura 7 – Capacitores plásticos**

#### 2.4.3 - Capacitor cerâmico

Capacitores cerâmicos: apresentam como dielétrico um material cerâmico, que é revertido por uma camada de tinta, que contém o elemento condutor, formando as armaduras. O conjunto recebe um revestimento isolante. São capacitores de baixos valores de capacitância e altas tensões de isolação. A figura 8 mostramos dois tipos de encapsulamento (forma física real).



**Figura 8 – Capacitores cerâmicos**

#### 2.4.5 - Capacitor Eletrolítico

Consistem de uma folha de alumínio anodizada como armadura positiva, onde por um processo eletrolítico, forma-se uma camada de óxido de alumínio que serve como dielétrico. Um fluido condutor, o eletrólito, que impregnado em um papel poroso, é colocado em contato com outra folha de alumínio de maneira a formar a armadura negativa. O conjunto é bobinado, sendo a folha de alumínio anodizado,



ligada ao terminal positivo e a outra ligada a uma caneca tubular (encapsulamento do conjunto), e ao terminal negativo.

Os capacitores eletrolíticos, por apresentarem o dielétrico como um fina camada de óxido de alumínio e em uma das armaduras um fluído, constituem um série de altos valores de capacitância, mas com valores limitados de tensão de isolamento e terminais polarizados.

De forma idêntica, encontramos os capacitores eletrolíticos de tântalo, onde o dielétrico é formado por óxido de tântalo, cuja constante dielétrica faz obter-se um capacitor de pequenas dimensões, porém com valores de isolamento mais limitados.

Na figura 9 são mostrados dois tipos de encapsulamento (forma física real), um axial, onde existe um terminal de cada lado do capacitor e outro radial, com os dois terminais do mesmo lado.



Axial

Radial

**Figura 9 – Capacitor eletrolítico com terminais de saída axial e radial**

## 2.5 - METODOS DE DETERMINAÇÃO DO ÂNGULO DE DEFASAGEM.

Segundo Balbinot (2006) uma das maneiras mais fáceis de executar uma medida de defasagem é utilizar o osciloscópio com dois canais para medir os dois sinais defasados (necessariamente de igual frequência). Um dele é colocado como referência na escala de tempo, como, por exemplo, no ponto de tempo em que o sinal passa por um valor zero na escala de amplitude, tal como o sinal A na figura 10.

A partir do ponto de referência no tempo, mede-se o tempo até o mesmo ponto do sinal do segundo canal. Esse é o tempo de atraso entre os dois sinais.

Basta então medir o período do sinal (inverso da frequência) e usar a equação 8 para obter o ângulo de defasagem.

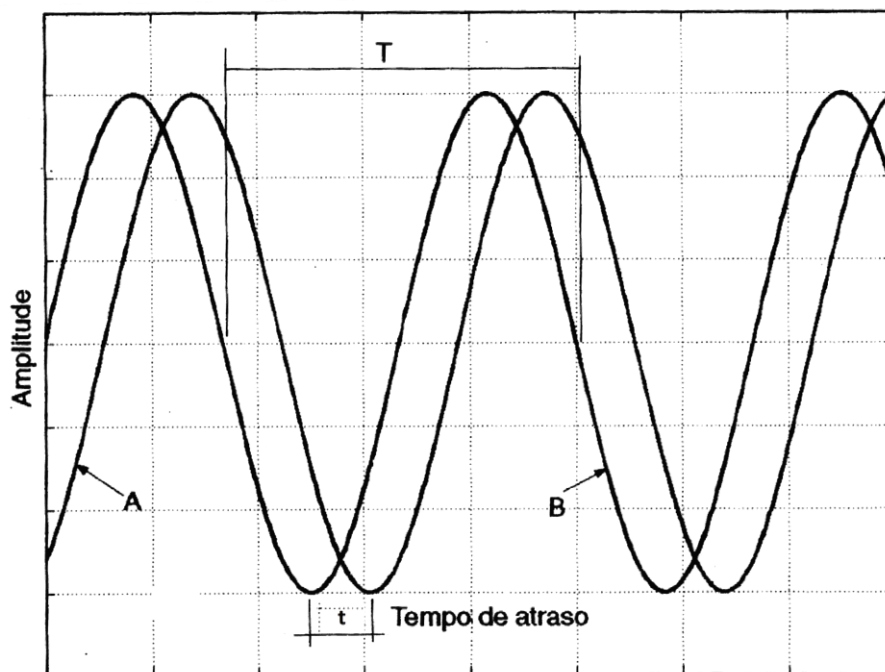
$$\theta = 360^{\circ} \frac{t}{T} \quad (8)$$

Sendo:

$\theta$  = Ângulo de defasagem

$t$  = Tempo entre os dois sinais

$T$  = Medida do período do sinal



**Figura 10 – Medida de utilização de defasagem entre dois sinais.**

**Fonte: GILLIES (1993, pg 110)**

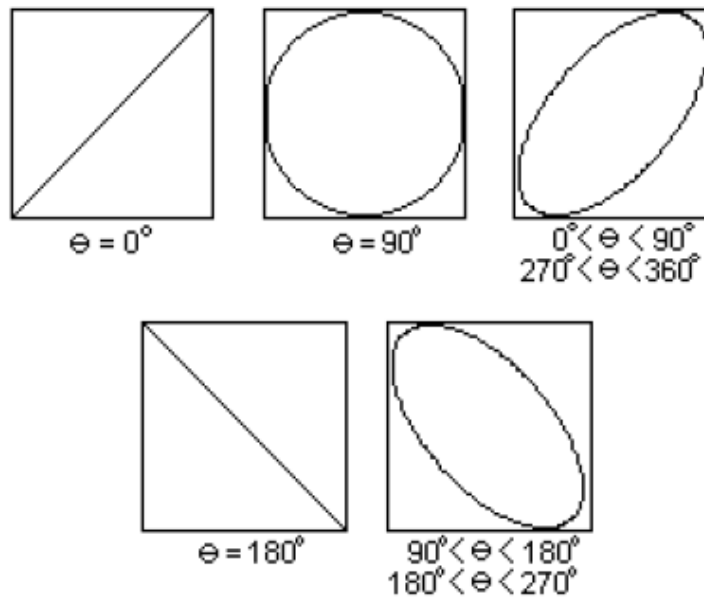
Outra maneira de medir a defasagem com o osciloscópio é utilizar as figuras de Lissajous (BALBINOT, 2006). As Figuras de lissajous são composições gráficas de dois movimentos ondulatórios, um na horizontal e outro na vertical, obtidas nas placas horizontais do osciloscópio quando são aplicadas tensões senoidais de frequência igual ou múltipla da tensão na placa vertical. As figuras são obtidas na tela, devido à interação do feixe eletrônico com os campos elétricos variáveis e perpendiculares.

Em cada instante o feixe atingirá a tela em uma posição diferente. A situação volta a se repetir ao final de um tempo que é mínimo múltiplo comum dos períodos de variação das duas tensões. O efeito visual é o de uma trajetória contínua que se inscreve em retângulos cujos lados correspondem às deflexões máximas do feixe eletrônico nas direções vertical e horizontal respectivamente. São utilizadas para medidas de frequência e ângulo de defasagem. As figuras podem ser obtidas em dois casos: a) quando as tensões senoidais aplicadas possuem a mesma frequência porém uma defasagem; b) quando as tensões aplicadas na horizontal e na vertical possuem frequências diferentes.

a) Quando as tensões senoidais aplicadas possuem a mesma frequência porém uma defasagem.

Essas figuras são criadas conectando-se os sinais em dois canais do osciloscópio, colocado no modo XY. Neste modo, um dos canais toma a direção horizontal e o outro a direção vertical. Assim, se as frequências dos dois sinais forem iguais, a forma de onda na tela do osciloscópio será uma elipse. Dependendo do atraso, os parâmetros e sua conseqüente forma variam. Considerando "a" a distância do ponto em que a figura corta o eixo vertical até o ponto central e "b" a distância desse ponto central até o ponto máximo da figura, também no eixo vertical, como pode ser visto na figura 12.

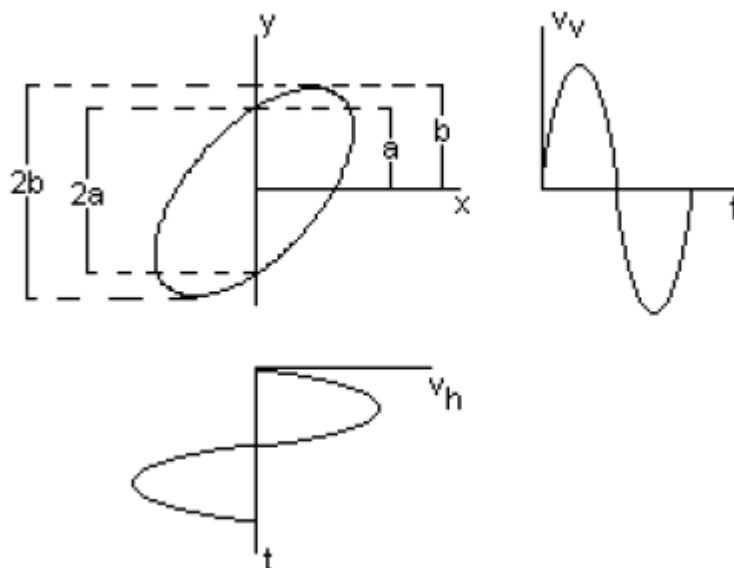
A forma da elipse (figura de Lissajous) dependerá do ângulo de defasagem. A figura 11 mostra o formato das figuras na tela do osciloscópio.



**Figura 11 – Composição de 2 sinais defasados e a elipse resultante.**

Para determinada equação a defasagem através da elipse obtida, basta obter os valores de  $a$  e  $b$ , onde  $a$  representa a distância entre o centro da elipse e o ponto onde esta corta o eixo  $y$  e  $b$  representa a distância entre o centro da elipse e o ponto máximo da figura. Para facilitar a leitura, podemos determinar os valores de  $2a$ ,  $2b$ . A defasagem é calculada pela equação 9.

$$\theta = \arcsen \frac{2a}{2b} \quad \text{ou} \quad \text{sen}\theta = \frac{a}{b} \quad (9)$$



**Figura 12 – Medida da fase entre duas ondas**

b) Quando as tensões senoidais aplicadas possuem frequências diferentes.

Neste caso teremos na tela do osciloscópio figuras complexas. A figura 13 mostra o caso em que a frequência do sinal injetado na vertical é duas vezes maior que a frequência do sinal injetado na horizontal. A figura obtida é um oito deitado. Na figura 13 seria a mesma se a relação entre as frequências fossem 100 para 50 como 200 para 100, etc...A forma da figura depende então da relação entre as frequências.

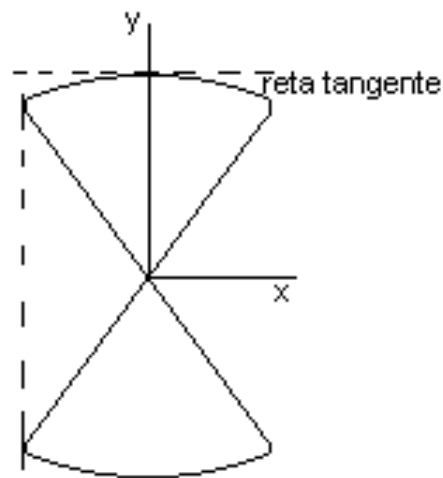


Figura 13 – Medida de frequência usando figura de lissajous.

Uma maneira prática de se determinar a relação entre as frequências é verificarmos os pontos de tangência da figura 13 obtida na linha horizontal  $N_h$  e vertical  $N_v$ . Da figura 13 vemos que a tangência horizontal corta uma vez e a tangência vertical corta duas vezes a figura, então:

$$1 f_h = 2 f_v$$

portanto

$$\frac{f_v}{f_h} = \frac{1}{2}$$

Generalizando:

$$\frac{f_v}{f_h} = \frac{N_h}{N_v} \quad (10)$$

Sendo:

$f_v$  = frequência vertical

$f_h$  = frequência horizontal

$N_v$  = número de tangência vertical

$N_h$  = número de tangência horizontal

Obs: esta técnica é válida para figuras fechadas.

Outra forma de determinar a frequência desconhecida (para qualquer figura, aberta ou fechada) é traçar uma reta na horizontal e vertical na qual corta o maior número de pontos possíveis. Assim você terá número de pontos na horizontal ( $N_h$ ) e vertical ( $N_v$ ) e pode usada a equação 10. A figura 14 mostra as figuras de lissajous em duas dimensões, e mostra a razão da frequência e a fase entre os dois movimentos perpendiculares.

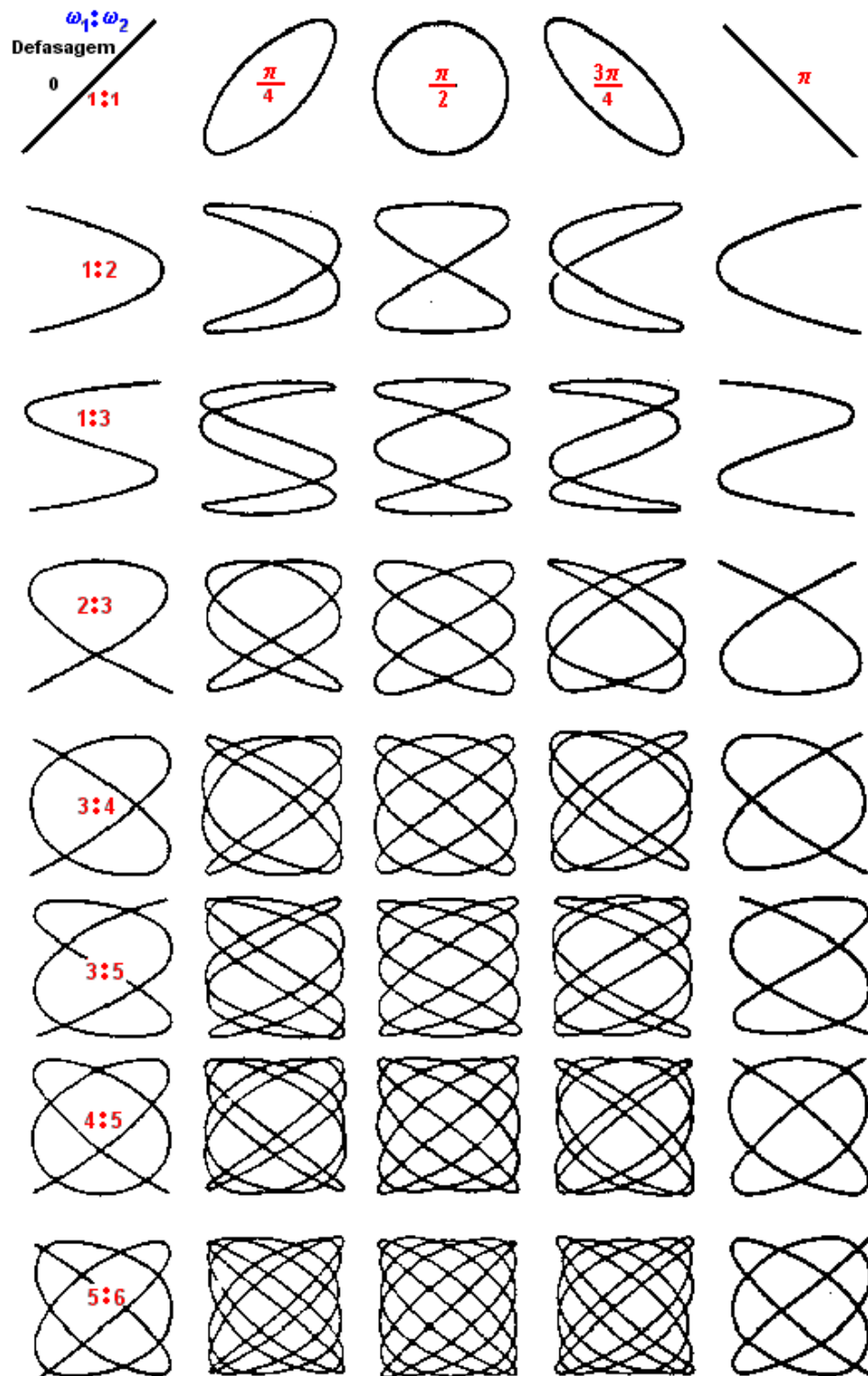


Figura 14 – Figuras de lissajous frequência x fase entre os dois movimentos perpendiculares

Fonte: GILLIES (1993, pg 133)

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 CÁLCULO DO CAPACITOR VARIÁVEL

O capacitor de placas paralelas é formado pela associação de capacitores em paralelo e foi calculado pela equação 5.

$$C_T = \varepsilon \frac{(n-1)S}{4\pi d} \quad (5)$$

Sendo:

$C_T =$  Capacitância total (UES)

$\varepsilon$  = Permissividade elétrica do meio material entre as placas.

$n$  = Numero de armaduras do condensador.

$S$  = Área em de uma das armaduras (cm<sup>2</sup>).

$d$  = Espessura do isolamento que separa as placas (cm).

Definimos que o capacitor deve ter uma capacitância de 7000  $\mu$ F, as armaduras serão de alumínio de 1,2 mm, o dielétrico com filme de poliéster de 0,25 microns com constante dielétrica de 3,6, a espessura do isolamento (ar + dielétrico) 0.9 mm, a área da armadura de 58 cm<sup>2</sup>. Assim podemos calcular o numero de armaduras do condensador.

$$7000 \mu\text{F} = 6300 \text{ UES}$$

$$6300 = 3,35 \frac{(n-1) 58}{4\pi 0,09} \quad n \cong 35 \text{ armaduras}$$

Para construir um capacitor de 7000  $\mu$ F serão necessárias 35 armaduras.



Recalculado para 35 armaduras temos:

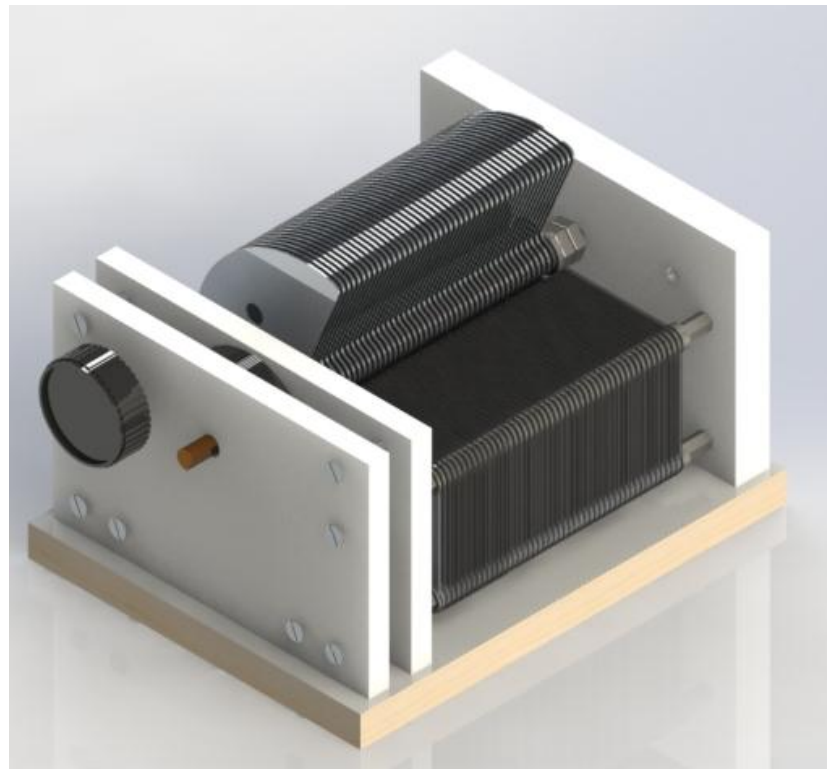
$$C_T = \varepsilon \frac{(35-1) 58}{4\pi 0,09} \qquad C_T = 6277 \text{ UES}$$

$$C_T = 6974 \mu\text{F}$$

Pelos cálculos o capacitor terá uma capacitância de 6974  $\mu\text{F}$  ou 6,974 nF.

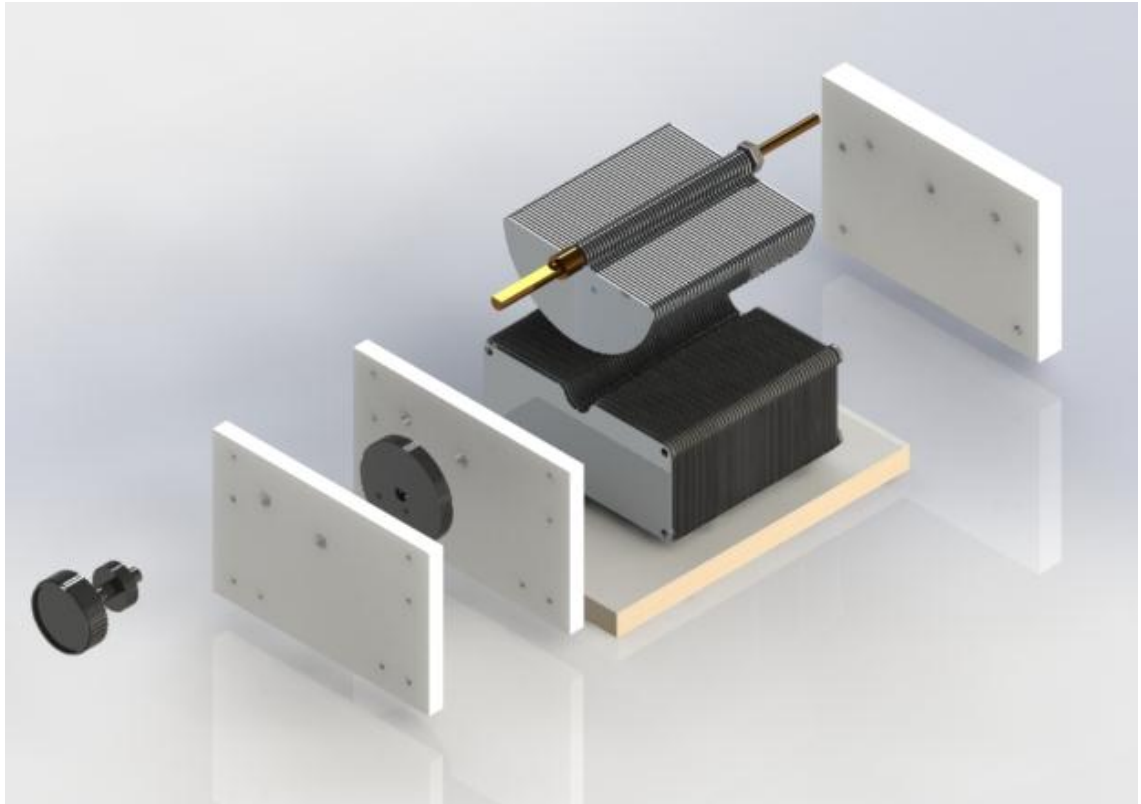
### 3.2 PROJETO E EXECUÇÃO DO CAPACITOR VARIÁVEL

O projeto de dimensionamento do capacitor variável foi desenvolvido através do uso de *software* para desenvolvimento de projetos *Solidworks®*. A figura 15 mostra o capacitor numa visão em 3D.



**Figura 15 – Capacitor variável em 3D**

O capacitor é formado basicamente pela estrutura de fixação (base, placas frontais, placa do fundo, sistema de movimentação da armadura móvel, armadura fixa (estator), armadura móvel (rotor) e base de fixação. Na figura 16 temos um detalhamento em vista explodida dos conjuntos que compõem o projeto.



**Figura 16 – Capacitor variável vista explodida em 3D**

### 3.3 CONFECÇÃO DAS PEÇAS E MONTAGEM DO CAPACITOR.

A confecção e montagem do capacitor em quase sua totalidade foi desenvolvido utilizando-se a estrutura dos laboratórios do Curso Superior de Tecnologia em Manutenção Industrial da UTFPR – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Câmpus de Medianeira – PR. Nos tópicos a seguir mostraremos com detalhes todas as peças do projeto.

#### 3.3.1 Armadura Fixa.

A armadura fixa é composta por materiais resistentes a corrosão, as chapas da armadura são alumínio de 1,2mm, os espaçadores entre as placas são arruelas de aço inox 304, a fixação das placas no conjunto é por parafusos de latão e o isolante (dielétrico) é de filme de poliéster. A Figura 17 mostra conjunto placas fixas (estator).

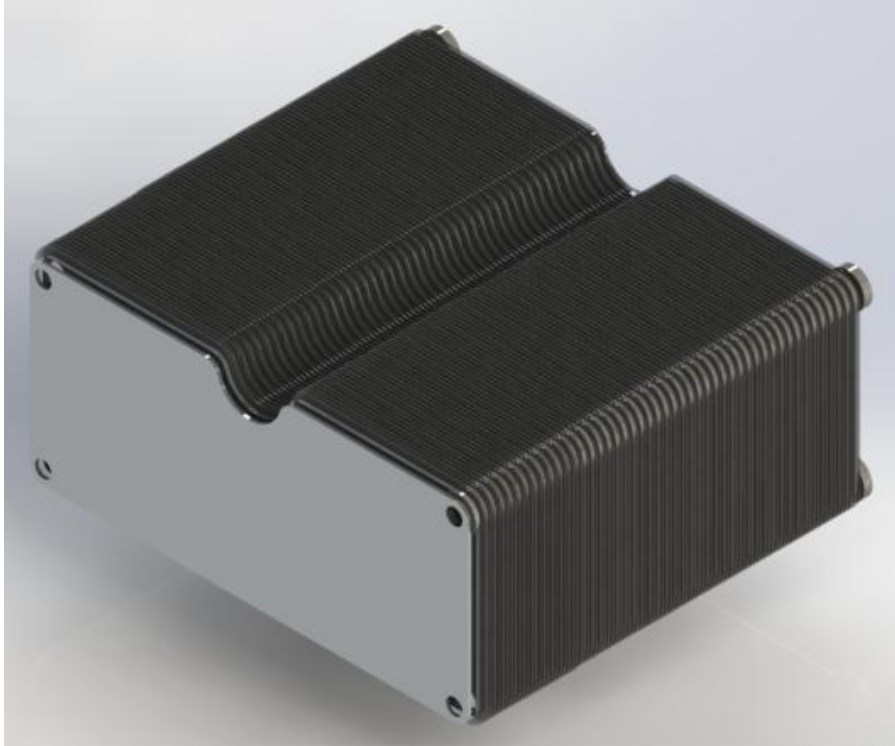


Figura 17 – Conjunto placas fixas (estator)

O conjunto é composto por 35 placas em alumínio de espessura de 1,2mm que foram confeccionadas em processo por CNC corte com jato d'água (serviço contratado para a empresa Qualijet Sistemas de Corte LTDA).

A Figura 18 mostra o desenho da placa fixa da armadura.

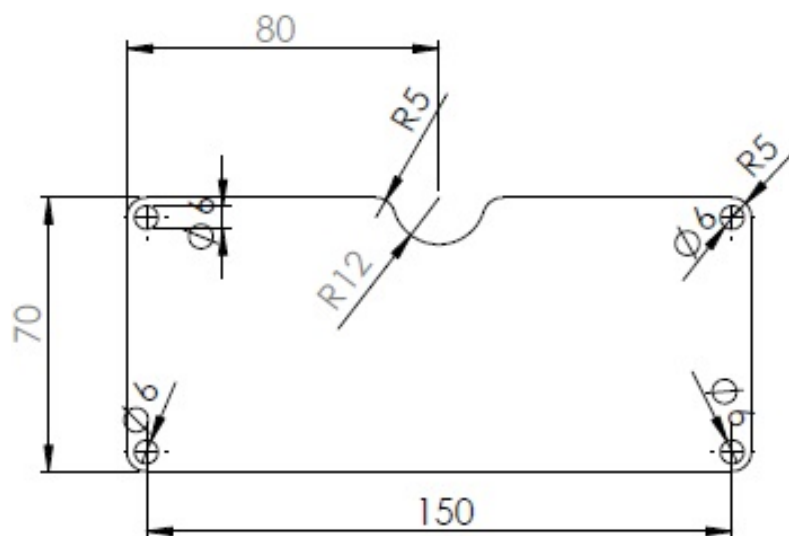
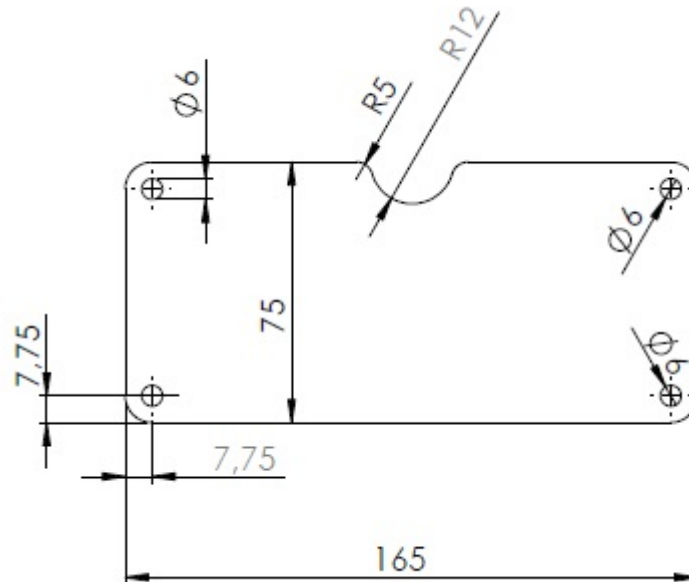


Figura 18 – Placa fixa da armadura

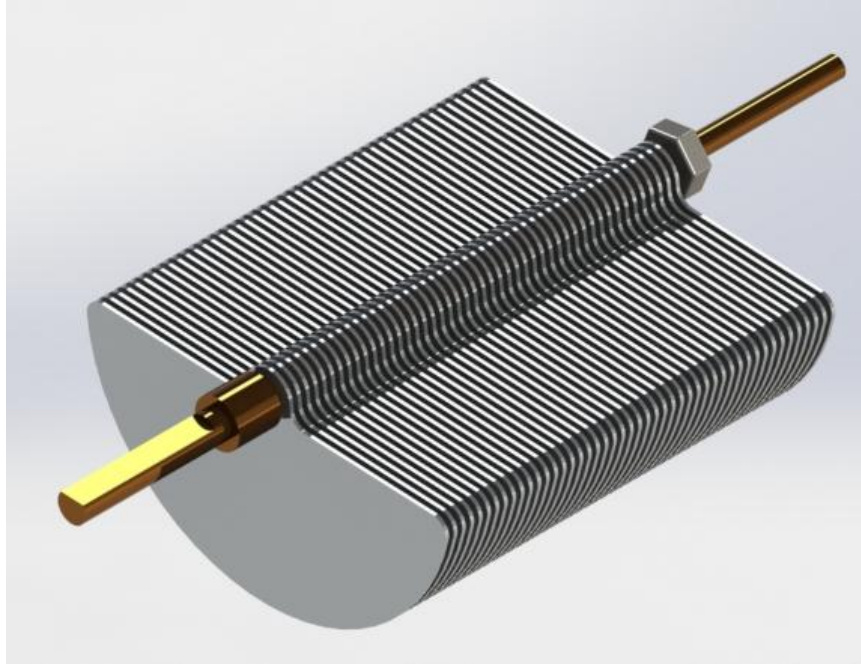
Em cada face das placas da armadura temos o dielétrico de filme de poliéster da DUPONT®, são 68 filmes, com espessura de 250 micron, que foram confeccionados manualmente, de acordo com as dimensões do projeto. A Figura 19 mostra o desenho do dielétrico.



**Figura 19 – Placa isolante (dielétrico)**

### 3.3.2 Armadura móvel.

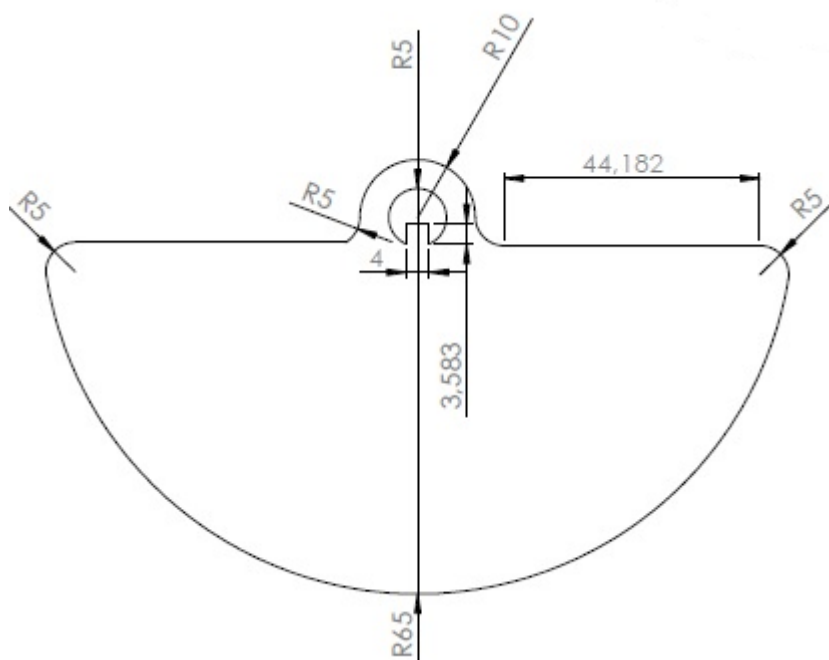
A armadura móvel também é composta por materiais resistentes a corrosão. As chapas da armadura são alumínio de 1,2mm de espessura, os espaçadores entre as placas são compostos por 2 arruelas lisas de aço inox 304 com 1,5mm de espessura, o conjunto é montado em um eixo de latão (Figura 20) e a fixação das placas no eixo é por porca e contraporca de aço inox 304. A Figura 20 mostra o conjunto placas móveis (armadura móvel ou rotor).



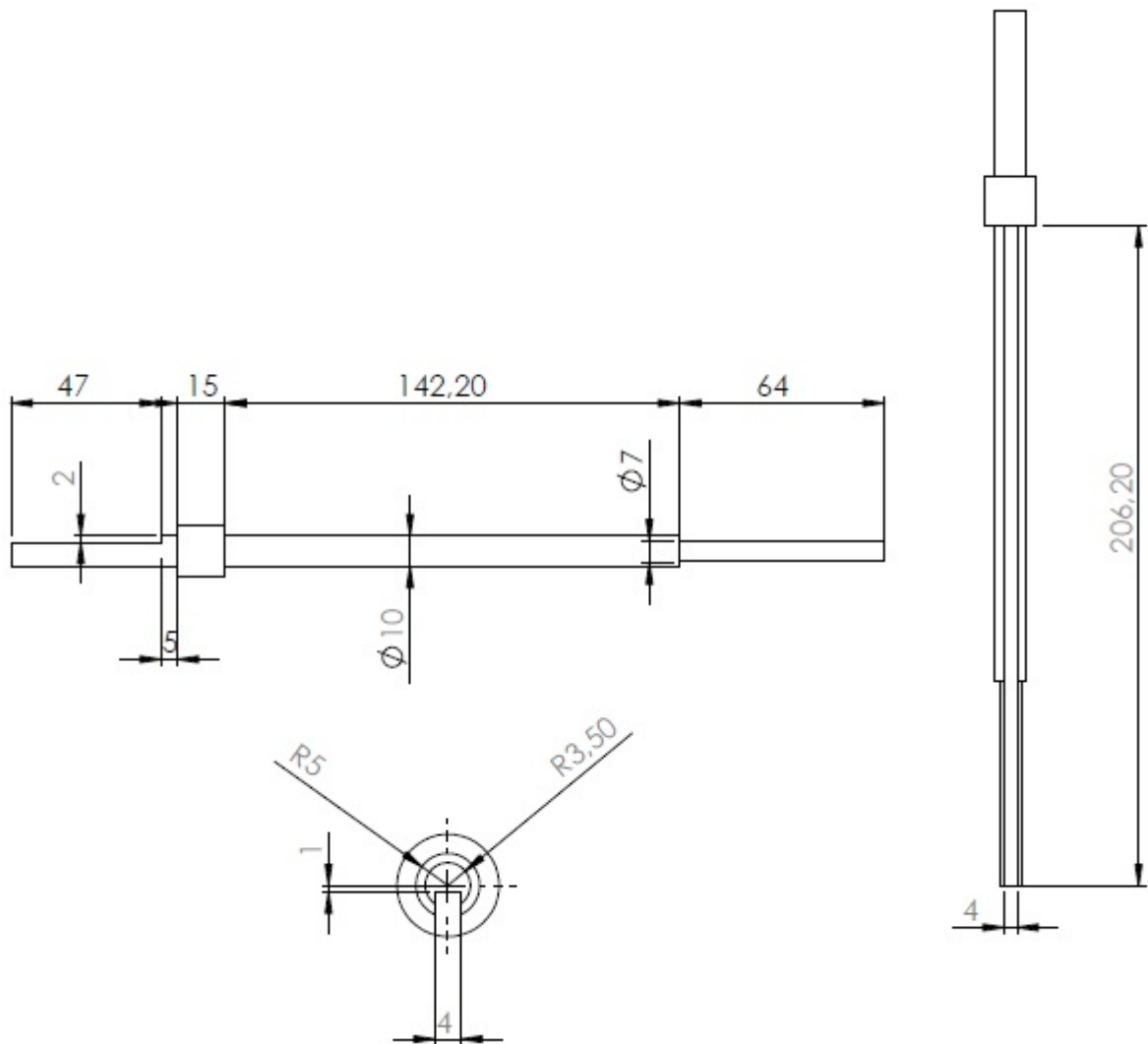
**Figura 20 – Conjunto placas móveis (armadura móvel)**

O conjunto é composto por 34 placas em alumínio de espessura de 1,2mm que foram confeccionadas em processo por CNC corte com jato d'água (serviço contratado para a empresa Qualijet Sistemas de Corte LTDA).

A Figura 21 mostra o desenho da placa móvel da armadura. E na figura 22 o eixo da armadura móvel (rotor).



**Figura 21 – Placa móvel da armadura**



**Figura 22 – Eixo da armadura móvel**

### 3.3.3 Estrutura de fixação

O rotor e estator tem como estrutura de fixação duas placas frontais (espessura 12 mm) e uma de fundo (espessura 18 mm), confeccionadas em chapas planas de *nylon*. Todo o conjunto foi fixado em uma base, fabricada em chapa de mdf melamínico de alta densidade e revestido nas duas faces. As figuras 23 e 24 mostram o desenho das placas frontais e de fundo do sistema de fixação.

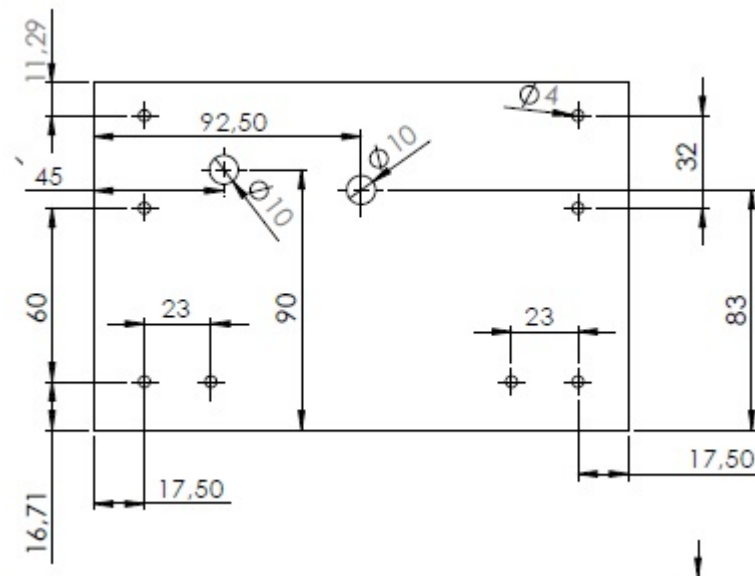


Figura 23 – Placa frontal do sistema de fixação

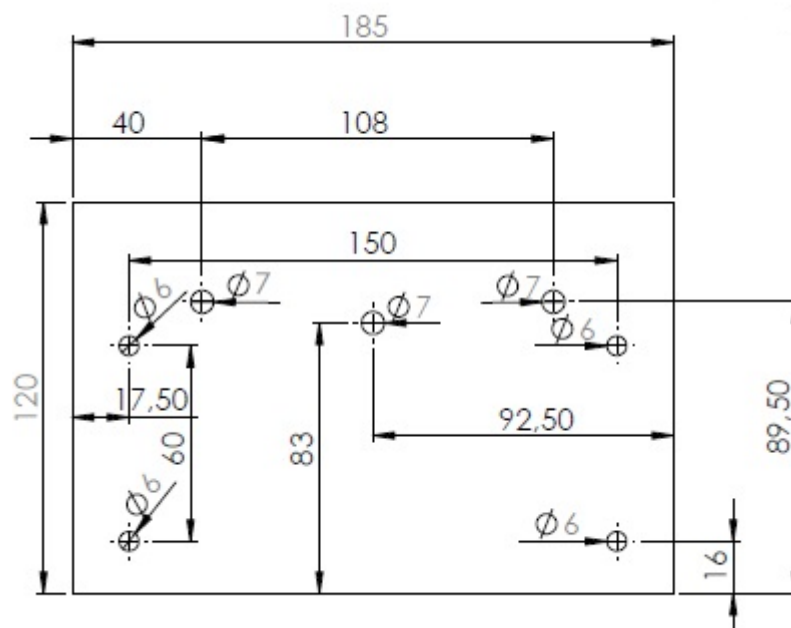
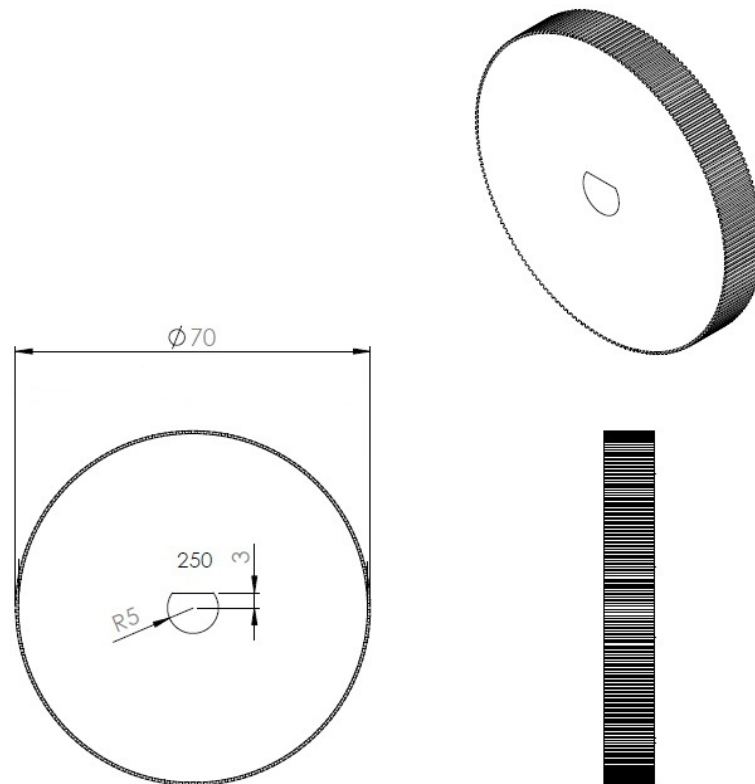


Figura 24 – Placa fundo do sistema de fixação

### 3.3.3.1 sistema de movimentação da armadura móvel (rotor)

Com o objetivo de aumentar a precisão do ajuste da capacitância e diminuir a força para movimentar o rotor, foi instalado entre as placas frontais do sistema de fixação um sistema de redução por engrenagens. Por serem de pequenas

dimensões e por falta de máquinas e equipamentos seria difícil a sua construção nos laboratórios da UTFPR. Por isso reaproveitamos engrenagens de outros equipamentos que estavam na sucata, provavelmente devem ser de impressora ou máquina fotocopadora. A figura 25 mostra o desenho da engrenagem secundária (movida) e na figura 26 desenho do conjunto motor do sistema de movimentação rotor (sistema primário).



**Figura 25 – Engrenagem secundária**



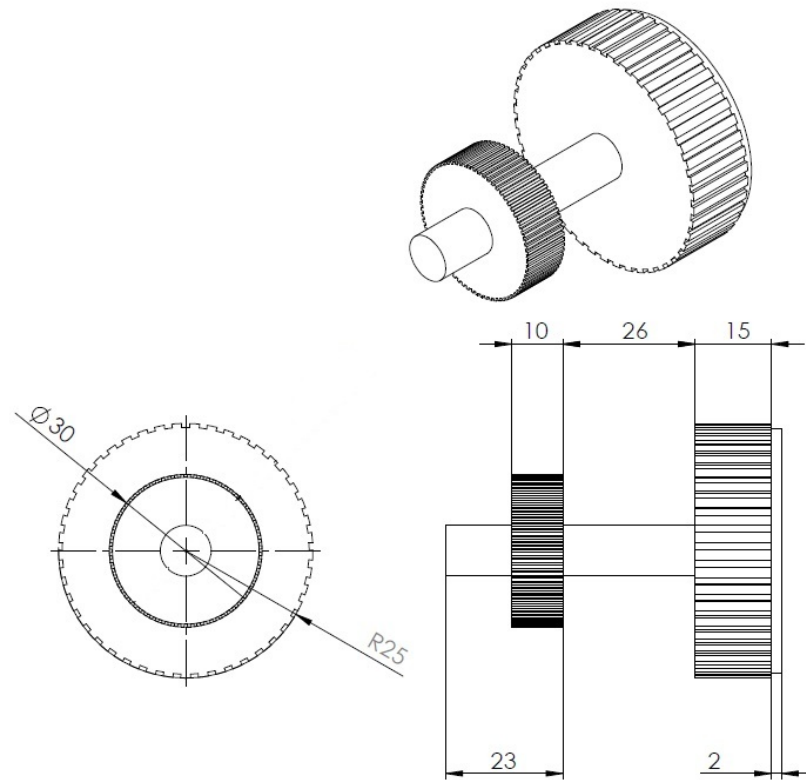


Figura 26 – Conjunto engrenagem primária

## 4 RESULTADOS E DISCUSÕES

### 4.1 CAPACITÂNCIA E FATOR DE QUALIDADE

Os ensaios de capacitância e de fator de qualidade foram realizados por ponte LCR Modelo 5010 da TOPWARD. Foram realizados para condição do capacitor aberto e fechado. Para capacitor fechado tem-se uma capacitância de 6,909 nF e um fator de qualidade de 15,24 conforme mostrado na figura 27. Para capacitor aberto temos uma capacitância de 171,8  $\mu$ F e, neste caso o, fator de qualidade está fora de escala e não se aplica porque o circuito está praticamente aberto (figura 28). O valor de capacitância calculado foi de 6,974 nF e o medido é de 6,909 nF, o que representa um erro mensurável de 0,92%.

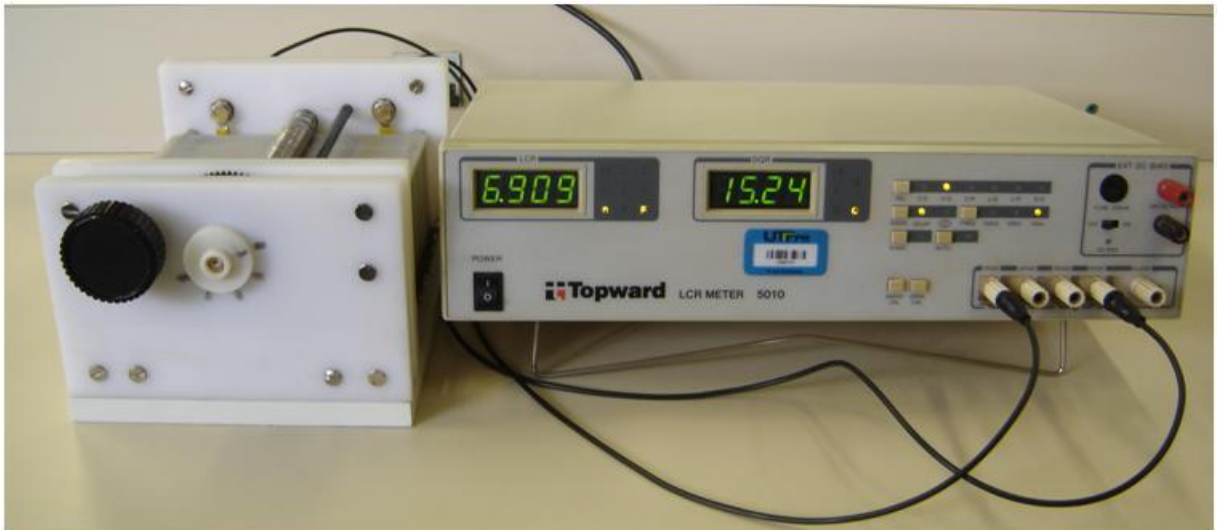


Figura 27 – Medida de capacitância e fator de qualidade com capacitor fechado

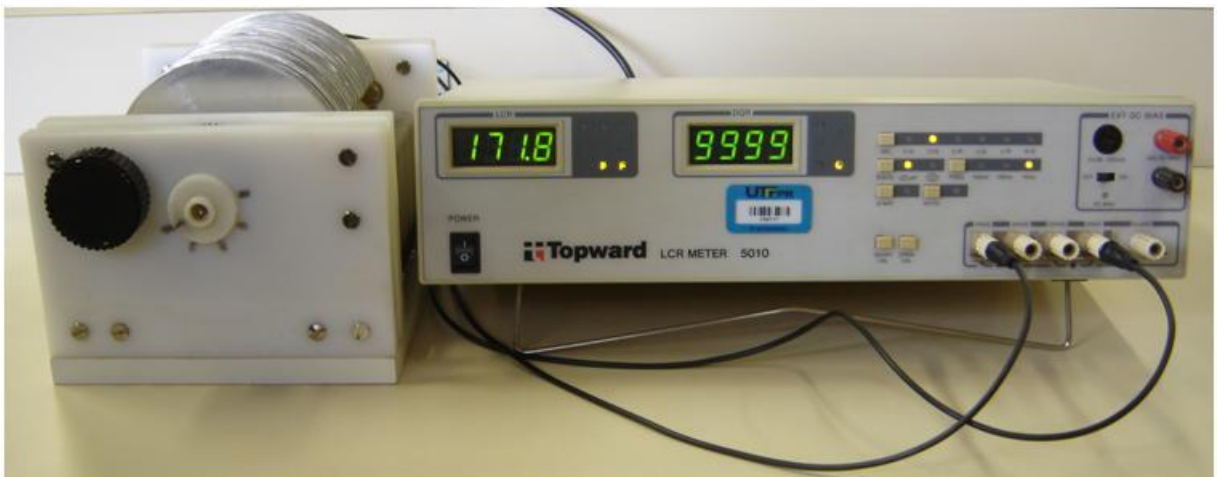


Figura 28 – Medida de capacitância e fator de qualidade com capacitor aberto

## 4.2 ENSAIO DE ISOLAÇÃO

O teste de isolação é usado para determinar a intergridade do equipamento. Um teste de prova de isolação pode ser executado em equipamentos de qualquer capacitância. Ele é feito com tensão única, geralmente entre 500 e 5000V, por cerca de um minuto. É comum estressar a isolação acima de voltagens de trabalho normais a fim de detectar falhas sutis na isolação.

Durante o teste de curta duração, o megohmetro está conectado diretamente ao equipamento sendo testado e a tensão de teste é aplicada por cerca de 60 segundos. A fim de alcançar uma leitura de isolação estável em cerca de um minuto, o teste deve ser executado somente em equipamentos de baixa capacitância.

Para equipamentos classificados abaixo de 1000 volts, a leitura de isolação deve ser um valor de 1 M $\Omega$  ou maior. Para equipamentos classificados acima de 1000 volts, a resistência esperada deve crescer para um megohm por cada 1000 volts aplicados (FLUKE 2013). No projeto em questão foram realizados testes de isolação para os níveis de tensão de 1000 V, 2.500V e 5000V. e a cada nível de tensão efetuando a variação de capacitância do mínimo ao máximo. A figura 29 mostra os passos do teste. Na aplicação de tensões crescentes em passos, a isolação é exposta a stresses elétricos crescentes que podem revelar informações sobre falhas na isolação como furos, danos físicos ou fragilidade ou defeitos de montagem. Os testes revelaram que ocorreu falha na isolação em nível de tensão de 2,5 kV.

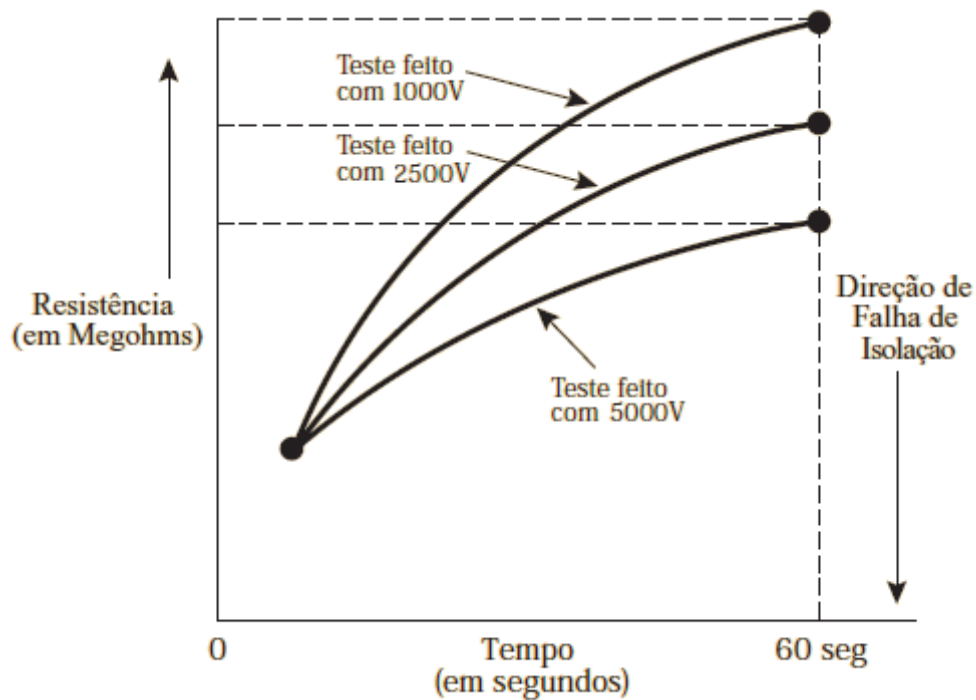


Figura 29 – Passos para os testes.

Fonte: FLUKE (2013)

Para o ensaio de isolamento foi utilizado o Megômetro digital portátil modelo MI-500 da INSTRUTHERM, com as seguintes características:

- Faixa de medição de Resistência: 0 a 200GΩ.
- Tensão de teste: 1000 / 2500 / 5000V
- Resolução: 0.01MW
- Precisão:- 0 a 200MW ± (3% leitura + 5 dígitos)  
200MW a 10GΩ ± (5% da leitura + 5 dígitos)  
10GΩ a 200GΩ ± (10% da leitura + 5 dígitos)

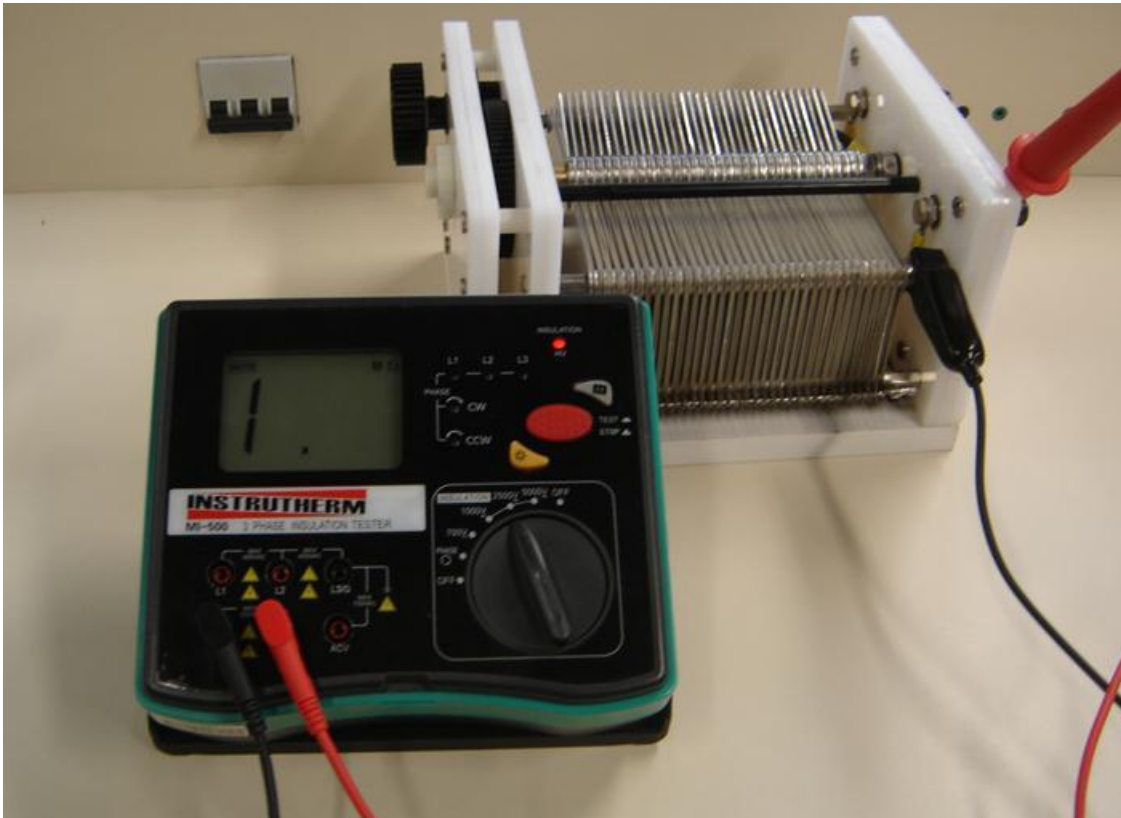
A faixa de medição máxima para o megômetro INSTRUTHERM MI-500 é 200 GΩ. Frequentemente, a resistência do isolamento poderá exceder esse valor, quando isso acontece, o display irá indicar “1”, significando que a resistência é muito alta e que o isolamento sendo testado é bom.

Os resultados mostrados na tabela 2 indicam os valores dos testes de isolamento.

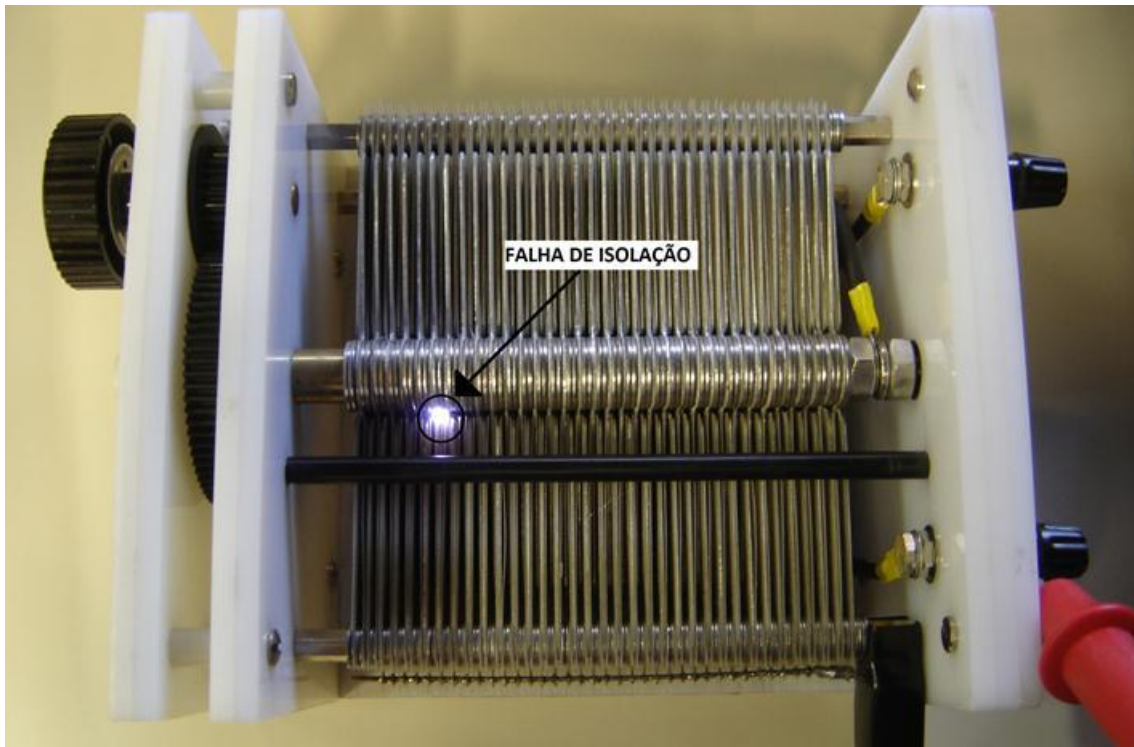
**Tabela 2 – Teste de isolação do capacitor**

CAPACITOR	1000 V	2500 V	5000V
Entre os terminais de alimentação	Aprovado	Reprovado	Reprovado
Entre os terminais e o invólucro	Aprovado	Aprovado	Aprovado

A figura 30 mostra o teste de isolação no capacitor Variável.

**Figura 30 – Teste isolação**

Nos testes de isolação quando foi aplicado 2500 V com o capacitor na capacitância máxima foi verificado a formação de arco voltaico entre o rotor e estator. (figura 31), porém diminuindo a capacitância o arco cessou quando a capacitância era menor que 6,4 nF, sendo aprovado então para a tensão de 2500 V para capacitâncias de 0,2 até 6,4 nF. Em uma inspeção visual encontramos uma placa isolante (dielétrico) montado de maneira inadequada ou com dimensões menores, comprometendo a isolação naquele ponto, para corrigir o problema o capacitor deve ser desmontado e substituído o isolante (dielétrico).

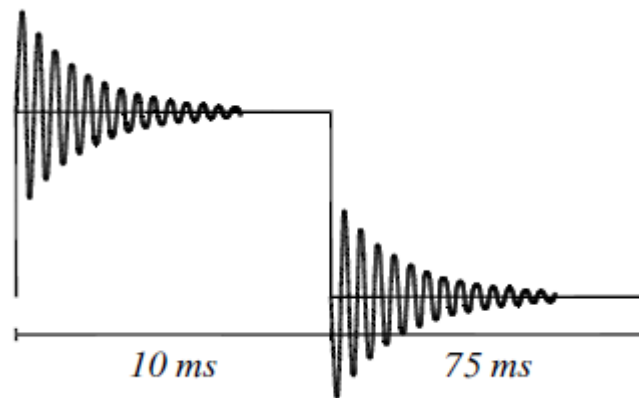


**Figura 31 – Falha de isolamento com tensão de 2,5 kV.**

### 4.3 TRANSIENTES EM CIRCUITOS RC

O comportamento transiente em circuitos RC avalia a resposta do circuito (comportamento oscilatório da corrente) como função dos elementos do circuito.

Quando do momento da comutação (energização das células capacitivas) o sinal da rede sofre um processo transitório severo (figura 32) até que seja atingido o valor nominal da carga. Durante este processo podem surgir picos de correntes elevadas, em frequências na faixa de centenas até milhares de hertz.

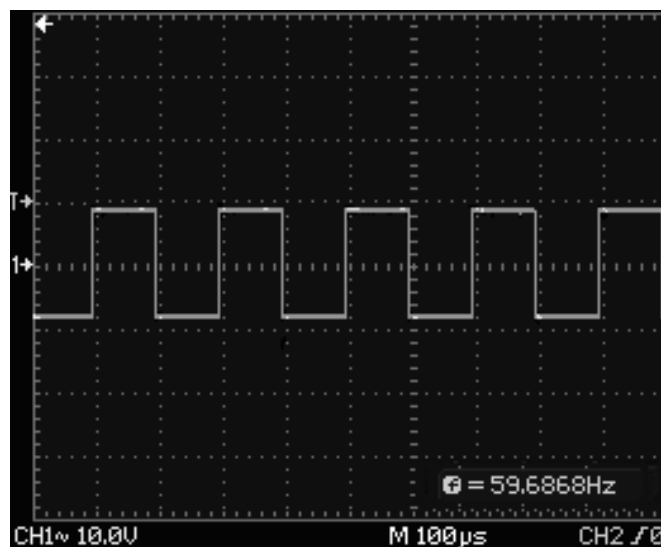


**Figura 32 – Forma de onda do Transitório no momento de comutação**

Os fatores determinantes para a amplitude da frequência e das correntes de ligação são as capacitâncias dos capacitores e as reatâncias presentes no circuito, bem como o valor instantâneo da tensão, no instante da alimentação.

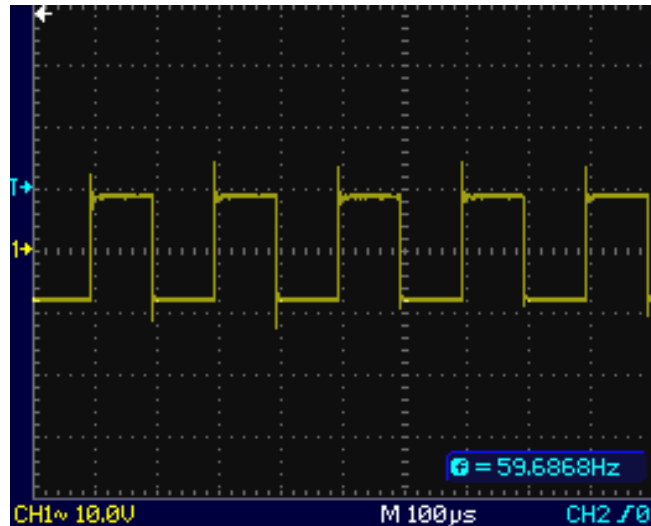
#### 4.3.1 Avaliação do transitório do circuito RC Capacitor

A verificação do efeito transitório do capacitor foi analisada através de um circuito RC série. Ajustou-se um gerador de sinais para fornecer uma onda quadrada com as características mostradas na figura 33 (canal 1)



**Figura 33 – Gerador de sinais ajustado para onda quadrada.**

No canal 2 do osciloscópio mediu-se a tensão nos terminais do resistor ( $V_R$ ), que é diretamente proporcional ao valor da corrente no circuito. A configuração utilizada para o osciloscópio foi: apenas o canal 2, 10V/Div, acoplamento AC, *trigger* Auto com *Source* no canal 2, sinal visto na figura 34, onde pequenas oscilações podem ser observadas na subida e descida do sinal.



**Figura 34 – Oscilações na onda quadrada.**

Após o sinal ser obtido, faz-se um ajuste na escala de tempo do osciloscópio para 250ns/div, destacando o sinal na tela, de modo a visualizar o sinal transitente. Assim sendo, calcula-se a partir dessa curva o período e a frequência de oscilação do transitório, bem como, a amplitude de cada pico e cada vale com relação ao terra.

Os valores obtidos a partir da à figura 35, que mostra um conjunto de oscilações em alta frequência no topo do sinal de onda, com registro de pico de 460mV, para uma amplitude de sinal de 20Vpp, na frequência de 60Hz. A oscilação do sinal é estimada pelo gráfico em 8MHz.



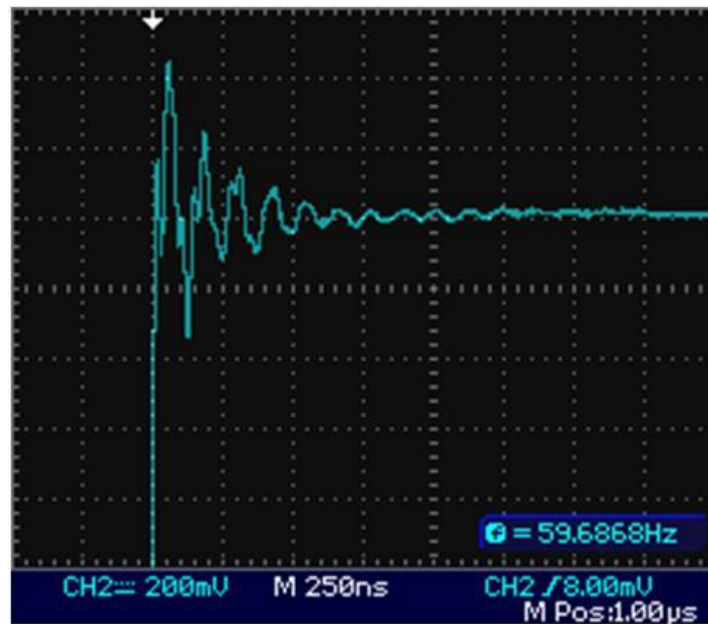


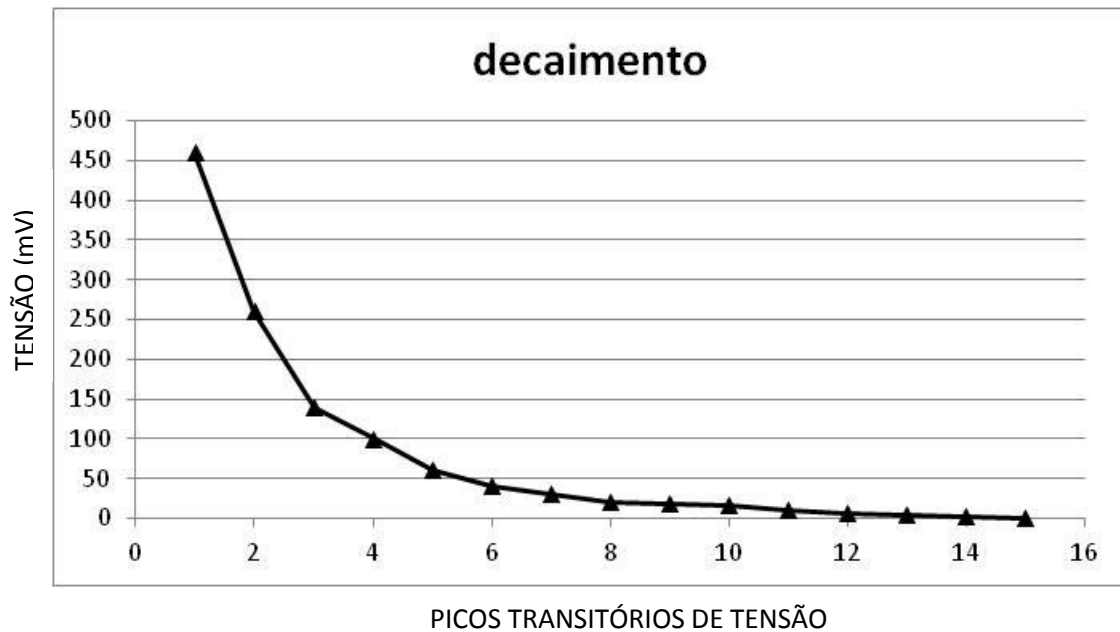
Figura 35 – Transitório de chaveamento do capacitor

A tabela 2 mostra o decaimento do sinal para o circuito RC, o capacitor tem seu valor de 6,909 nf e o resistor foi de 33M $\Omega$ .

Tabela 3 - Decaimento do sinal transitório

Picos	V <sub>pico</sub> (mV)	Picos	V <sub>pico</sub> (mV)	Picos	V <sub>pico</sub> (mV)
1	460	6	40	11	10
2	260	7	30	12	6
3	140	8	20	13	4
4	100	9	18	14	2
5	60	10	16	15	0

A curva de decaimento apresenta uma constante estimada em  $\zeta=1,75$  us, que pode ser visualizado no gráfico 01.



**Gráfico 01 Curva de decaimento.**

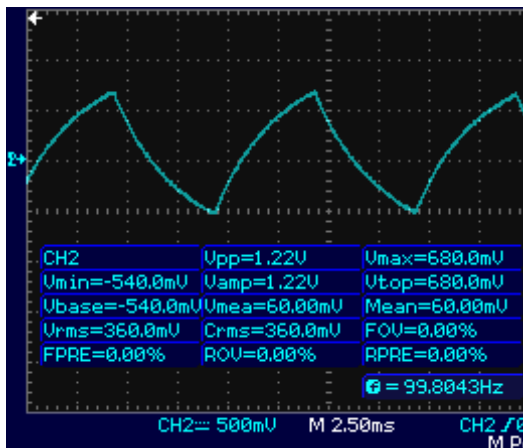
#### 4.4 RESPOSTA EM FREQUÊNCIA

O capacitor como elemento de circuito pode ser definido como um resistor dependente da frequência, pois a sua impedância é função da frequência de operação. Em frequências muito baixas o capacitor possui uma impedância elevada (circuito aberto) e em altas frequências esse comportamento se inverte, ou seja, a impedância capacitiva vai a zero (curto-circuito).

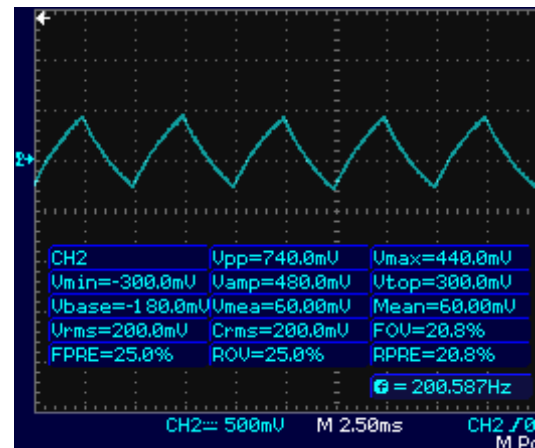
O ensaio de variação de frequência verificou o comportamento do capacitor quando regulado com sua maior capacitância. Como seu comportamento varia conforme a frequência, montou-se novamente o circuito RC série, e com o canal 2 do osciloscópio mediu-se a tensão nos terminais do capacitor, e observa-se a forma de onda. Para o osciloscópio foi utilizado apenas o canal 2, 500mV/Div, acoplamento AC, *trigger* Auto, e um sinal quadrado de 100Hz.

Nas figuras 36a e 36b se pode observar os valores do sinal e o início da diminuição da amplitude de carga e descarga. Conforme a frequência vai sendo aumentada de 100Hz para 200Hz, é diminuído o período de carga e descarga.

Conforme figura 36<sup>a</sup> em relação a 36b pode-se observar um decréscimo no valor de pico da onda do capacitor de 480mV.



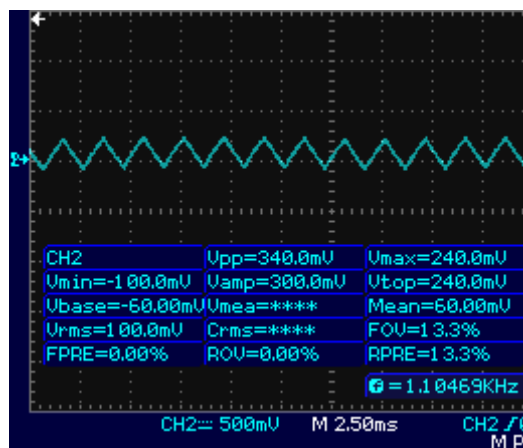
(a) Resposta a 100Hz



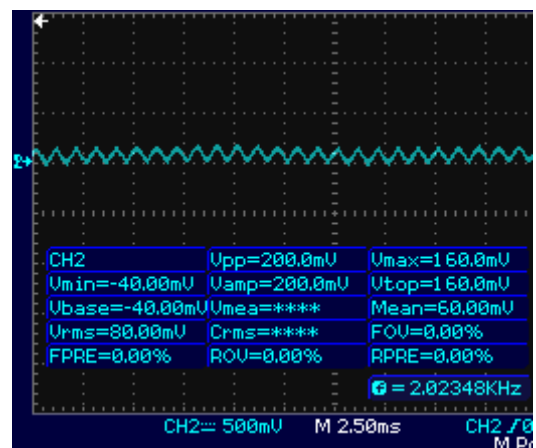
(b) Resposta a 200 Hz

**Figura 36 – Resposta De Frequência a 100Hz E 200Hz**

Quando a regulagem da frequência é mudada para cerca de 1 KHz, o valor da tensão de pico a pico ( $V_{pp}$ ) atinge 340mV, Figura 37a, e  $V_{pp} = 200\text{mV}$  quando a frequência é dobrada para 2KHz, Figura 37b.



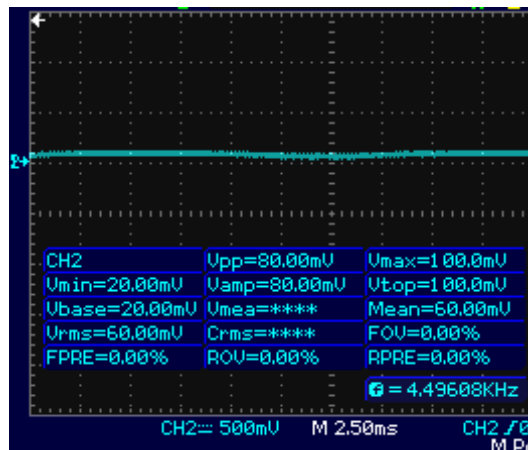
(a) Resposta a 1KHz



(b) Resposta a 2KHz

**Figura 37 – Resposta De Frequência a 1KHz E 2KHz**

Quando a regulagem da frequência do gerador de sinais atinge cerca de 4,5KHz, pode-se observar que o capacitor passa a se comportar praticamente como um curto circuito, ou seja passa a apresentar um sinal contínuo, conforme mostrado na figura 38.



**Figura 38 – Resposta De Frequencia a 4,5KHz**

#### 4.5 CURVA DE CARGA E DESCARGA DO CAPACITOR

Conforme se regula o capacitor pode se observar o sinal de carga e descarga, no esquema de montagem da figura 39.

Com um circuito RC série, e ajustando-se o gerador de sinais para fornecer uma onda quadrada 20Vpp. No canal 2 do osciloscópio mediu-se a tensão nos terminais do resistor (R1). A configuração utilizada para o osciloscópio foi: apenas o canal 2, 5V/Div, acoplamento DC, trigger Auto. Conforme se regula o Capacitor (figura 37), a capacitância aumenta até que se possa visualizar a curva de carga e descarga completamente, e assim verificar a constate do capacitor, e seu comportamento. Quando procede-se a variação de 0, 25%, 50%, 75% e 100% das lâminas fechadas, gradativamente a capacitância aumenta dando forma a curva de descarga. O comportamento do capacitor com essa variação pode ser observado nas figuras 40 a 43.

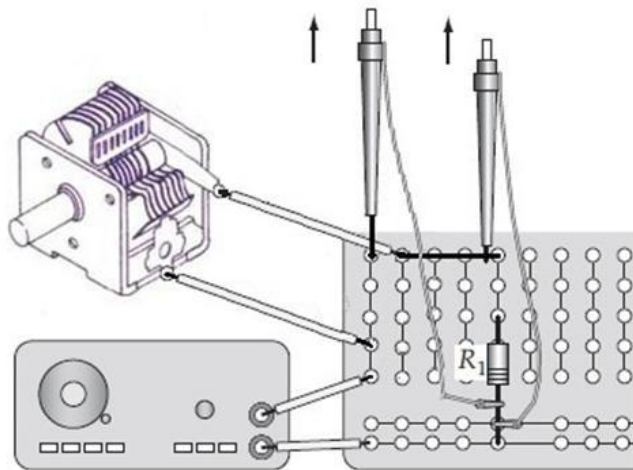


Figura 39 – Esquema de montagem

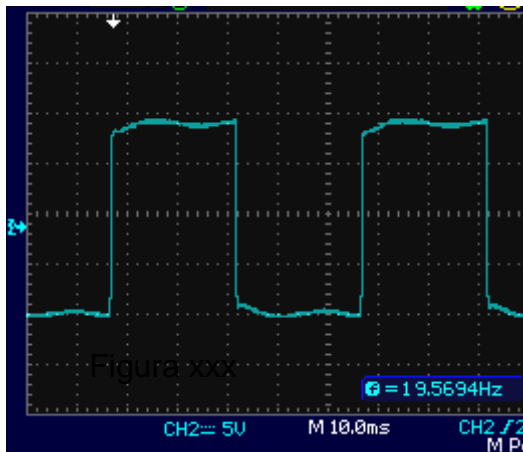


Figura 40 – Capacitor 100% aberto

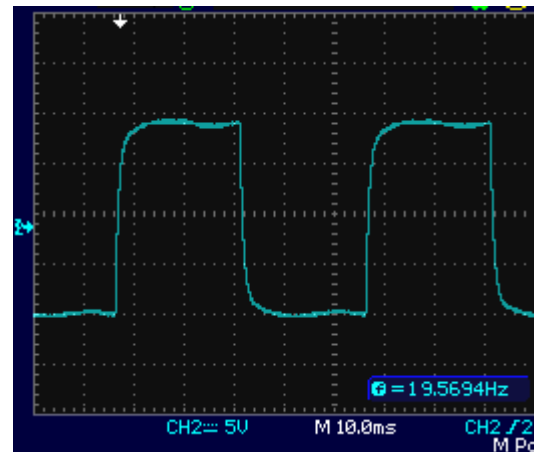


Figura 41 – Capacitor 75% aberto

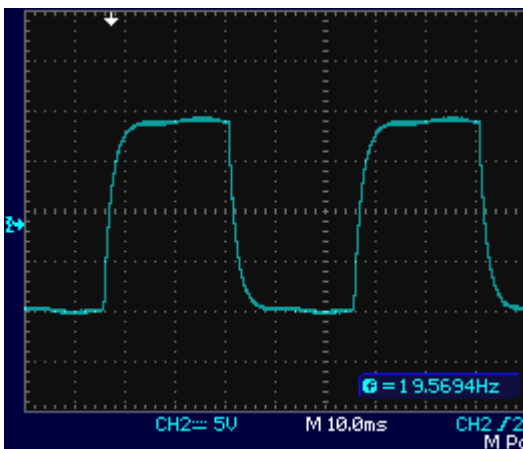


Figura 42 – Capacitor 50% aberto

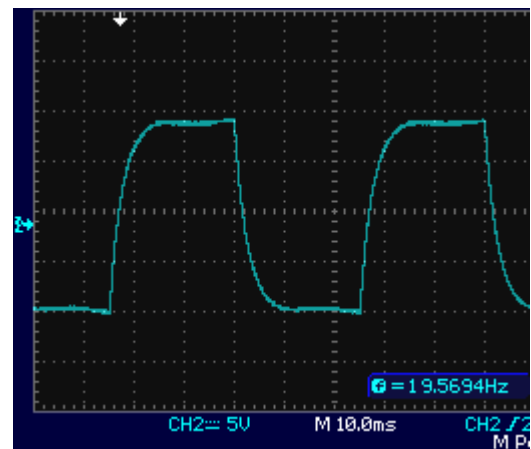


Figura 43 – Capacitor 25% aberto

As figuras 44 e 45 mostram respectivamente a curva de carga e descarga quando o capacitor atinge seu valor Máximo de 6,909 nF, ou seja, quando o mesmo esta totalmente fechado. O valor do tempo de carga é estimado em 18,00ms. Desta forma a constante de tempo 'e estimada no valor de 3,6ms, e o valor para a descarga é de 3,7ms.

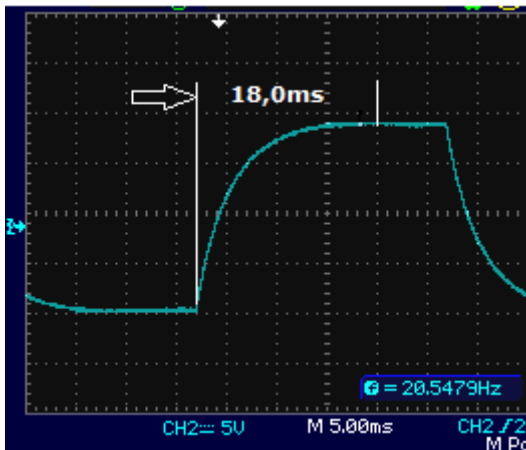


Figura 44 – Curva de carga Capacitor

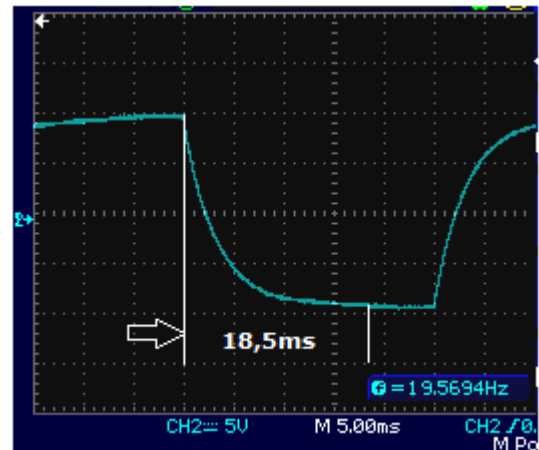


Figura 45 – Curva descarga Capacitor

#### 4.6 ANÁLISE DO FATOR DE POTÊNCIA

A análise do fator de potência foi em comportamento AC, com a correção do fator de potência de uma carga RL, com capacitor em paralelo.

Nas figuras 46 e 50 é possível verificar o fator de potência entre a onda obtida com o osciloscópio no resistor, sinal proporcional à corrente, o sinal de tensão de alimentação do circuito, que variam de  $4,32^\circ$  a  $41,04^\circ$  de defasagem, quando o capacitor se encontra fechado, e quando ele está totalmente aberto. O Fator de potência muda de 0,99 para 0,98, como pode ser visto no gráfico da figura 46 e da figura 47.

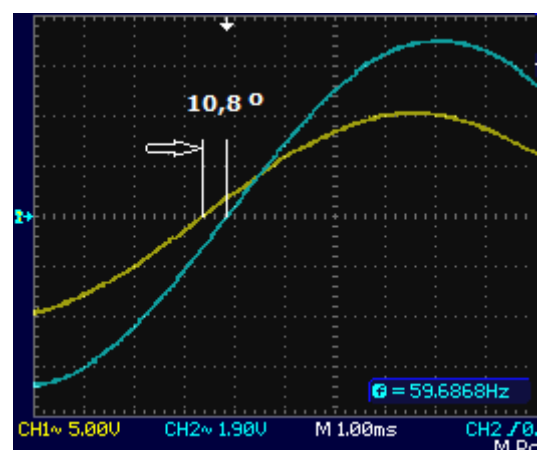
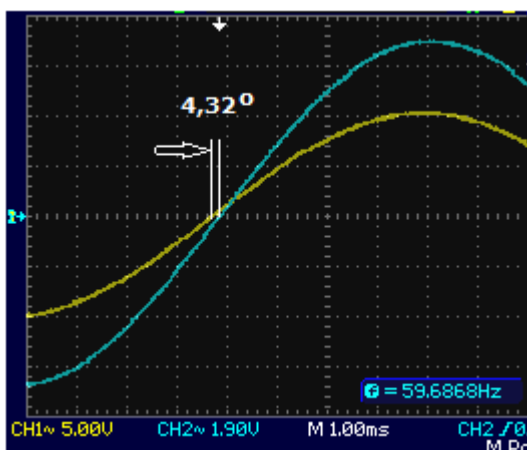


Figura 46 – Capacitor fechado

Figura 47 – Capacitor 25% aberto

Com o incremento da abertura do capacitor, figura 48 em 50% e figura 49 para 75%, o ângulo de defasagem aumenta de  $23,76^\circ$  para  $30,46^\circ$ .

Conseqüentemente o decréscimo do fator de potência de 0.92 para 0.86.

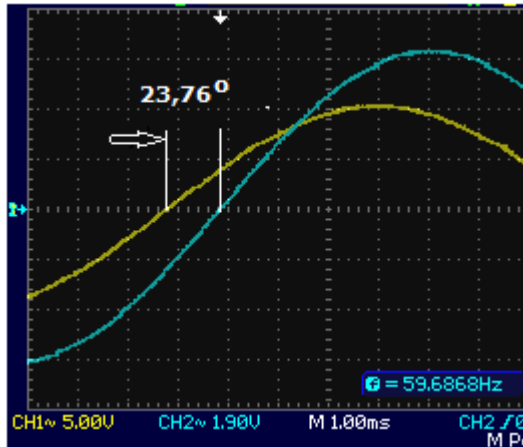


Figura 48 – Capacitor 50% aberto

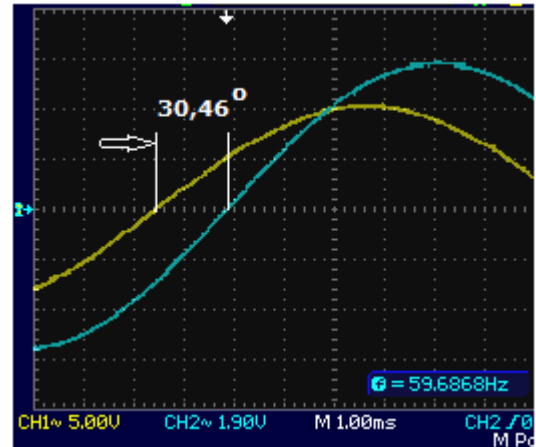


Figura 49 – Capacitor 75% aberto

Quando o capacitor atinge seu menor valor figura 50, o que faz com que a indutância fique dominante no circuito, resultando o maior ângulo de defasagem  $41,04^\circ$ , e conseqüentemente, o menor fator de potência no valor de 0,75.

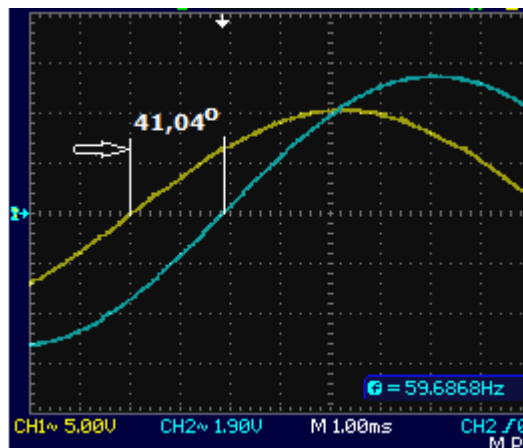
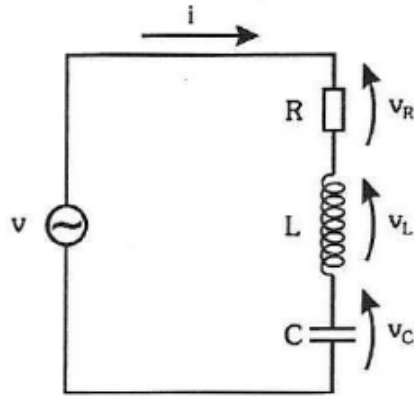


Figura 50 – Capacitor 100% aberto

#### 4.7 COMPORTAMENTO DO CAPACITOR EM AC EM CIRCUITO RLC SÉRIE.

O circuito RLC série é formado por um resistor, um indutor e um capacitor ligados em série. Conforme figura 51.

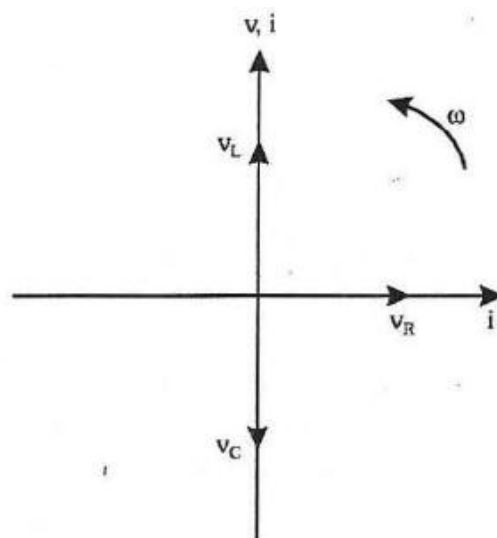


**Figura 51 – Circuito RLC**

Em um circuito RLC série, a tensão total aplicada é a soma vetorial das tensões no resistor, capacitor e indutor, isto é:

$$V = V_R + V_L + V_C \quad (10)$$

A figura 52 mostra o diagrama fasorial de um circuito RLC.



**Figura 52 – Diagrama fasorial Circuito RLC**



Com relação ao diagrama fasorial ideal da figura 52, pode-se observar que:

- A tensão no resistor está em fase com a corrente;
- A tensão no indutor está adiantada de  $90^\circ$  em relação à corrente;
- A tensão no capacitor está atrasada de  $90^\circ$  em relação à corrente.

Portanto, as tensões  $V$  e  $V_C$  estão defasadas de  $180^\circ$  entre si, sendo que a soma vetorial delas é a diferença entre seus módulos, com fase igual à da tensão de maior módulo.

Utilizando-se um indutor de  $7,261\text{mH}$  em série com o capacitor e um resistor de  $470\text{K}\Omega$ , aplicou-se um sinal senoidal de  $60\text{Hz}$  e amplitude de  $20\text{Vpp}$ . Com o uso de um osciloscópio, com o canal (CH1) na entrada do sinal e o canal CH2 ente o capacitor e o indutor pode-se verificar a modificação na amplitude do sinal conforme o capacitor variava de fechado  $6,9\text{ nF}$  para aberto  $171,8\text{pF}$ , o que faz com que a influência do indutor torne-se maior ( $V_i > V_c$ ). O comportamento pode ser visualizado nas figuras 53 e 57, que mostram uma variação da amplitude da tensão de  $0,7\text{V}$  com capacitor fechado, para  $8,45\text{V}$  com capacitor aberto.

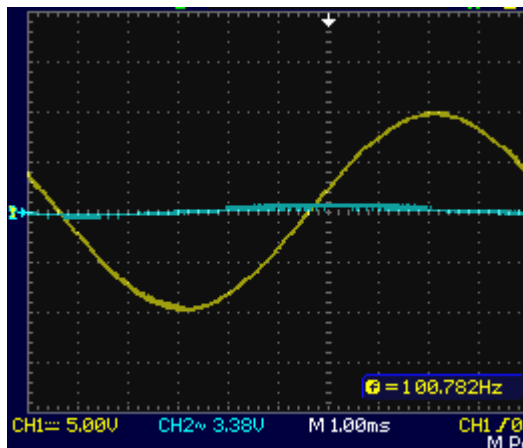


Figura 53 – Capacitor fechado

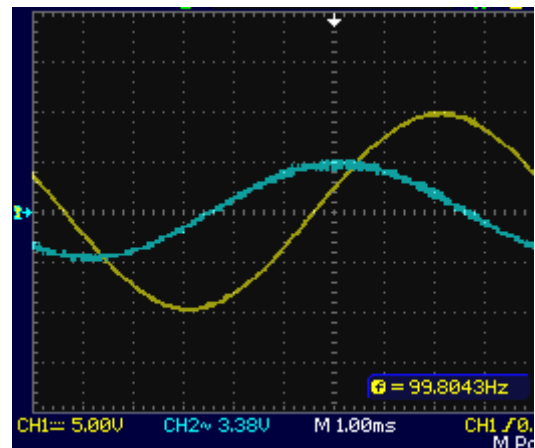


Figura 54 – Capacitor 25% aberto

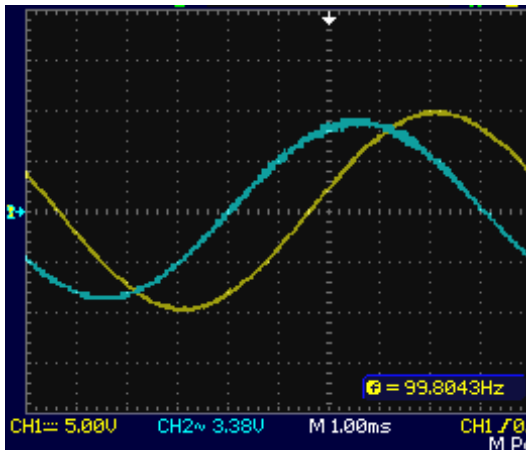


Figura 55– Capacitor 50% aberto

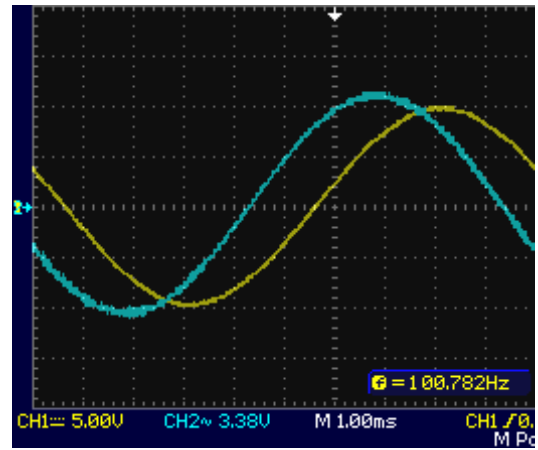


Figura 56 – Capacitor 75% aberto

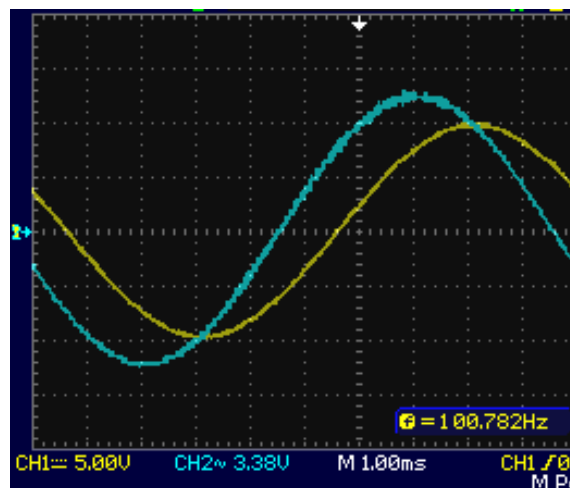


Figura 57 – Capacitor 100% aberto

#### 4.8 ENSAIO DE IMPEDÂNCIA

A impedância do circuito equivalente de um condensador pode ser modelada pelo circuito capacitor equivalente mostrado na figura 58. Em série com o condensador ideal,  $C_R$ , denominado capacitância nominal, é um equivalente série resistor  $R_s$  (ESR) e equivalente série indutor  $L_s$  (ESL).  $R_s$  é determinada pela resistência dos condutores e de junção, enquanto que  $L_s$  é a indutância dos eletrodos devido à construção e os cabos de alimentação. O valor de  $L_s$  é geralmente negligenciado em frequências mais baixas, abaixo da frequência de autorressonância.

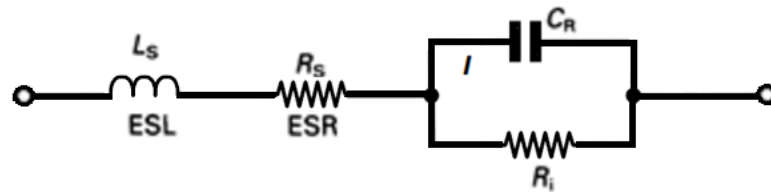


Figura 58 – Circuito Equivalente capacitor

A figura 59 mostra o diagrama fasorial.

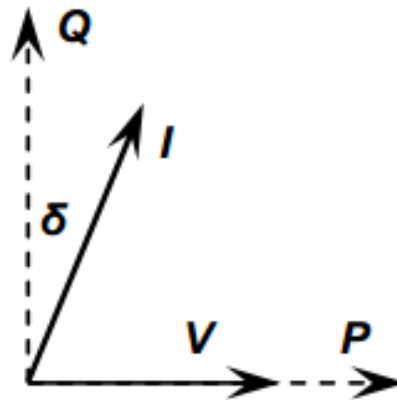


Figura 59 – Diagrama fasorial

Sendo  $\delta$  é o ângulo de perdas, e a  $\tan \delta$  é denominada como fator de dissipação, que é o inverso do fator de qualidade do circuito,  $Q$ . O ângulo  $\delta$  é necessário para fazer o capacitor defasar a corrente da tensão em  $90^\circ$ ,

A impedância elétrica  $Z$  de um capacitor é representada pela equação 11, sendo  $R_i$  negligenciado em função da resistência de isolamento que geralmente ser grande, é:

$$Z = R + jX (\Omega) \quad (11)$$

Na faixa de frequência de medição (60Hz), a indutância é considerada desprezível e o diagrama da impedância do circuito equivalente estabelece os principais parâmetros característicos de um capacitor.

O teste em tensão alternada objetiva a determinação dos parâmetros do modelo de circuito equivalente do capacitor (Figura 60).

Comportamento em Circuito CA rede elétrica.

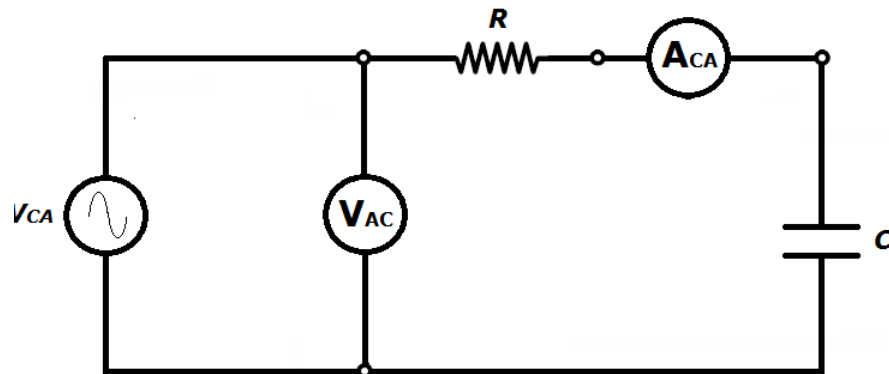


Figura 60 - Circuito de ensaio na tensão da rede elétrica

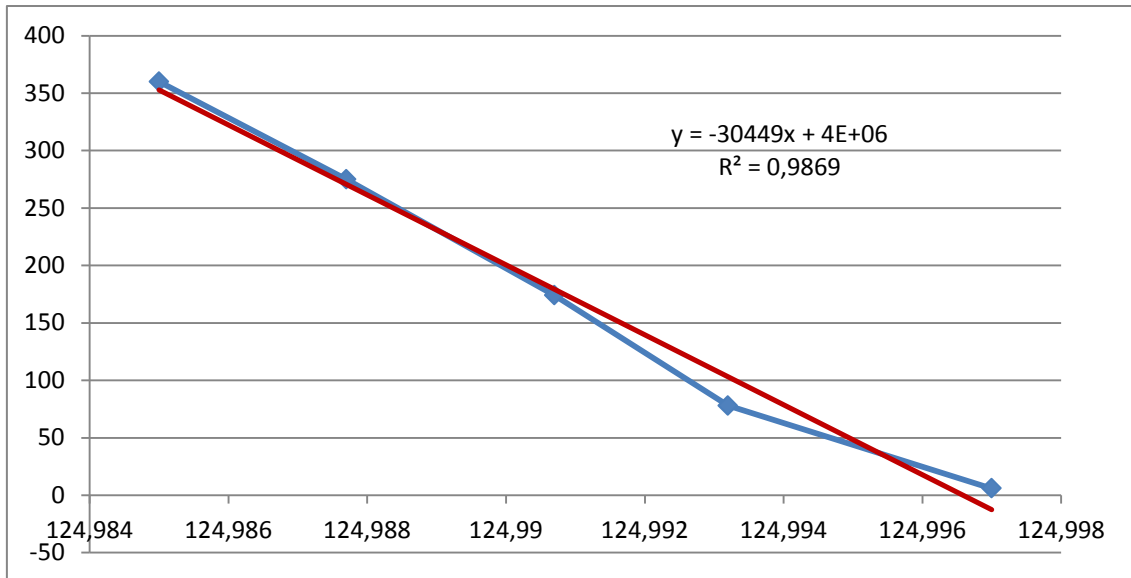
Os valores dos parâmetros do circuito equivalente foram obtidos por medida em uma ponte LCR, conforme mostra a tabela 04

Tabela 4 - Dados do ensaio de variação capacitiva comportamento da tensão e corrente

Varição do Capacitor	VR (mV)	I (mA)	VC (V)
0%	3	6	124.997
25%	6.8	78	124.9932
50%	9.3	174	124.9907
75%	12.3	275	124.9877
100%	15	360	124.985

O gráfico 2 mostra o comportamento linear da variação do capacitor na rede elétrica em função da tensão e das corrente do circuito com coeficiente de representatividade ( $R^2$ ) de 98,69 %..

Gráfico 02. Comportamento do capacitor em circuito CA.



#### 4.9 ÂNGULO DE DEFASAMENTO

Para determinação do ângulo de defasamento foi utilizando o método de *lissajous*. O circuito utilizado foi um circuito RC, conforme a figura 61.

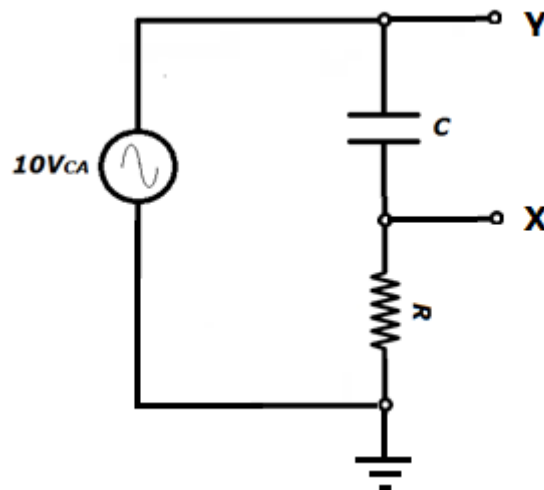


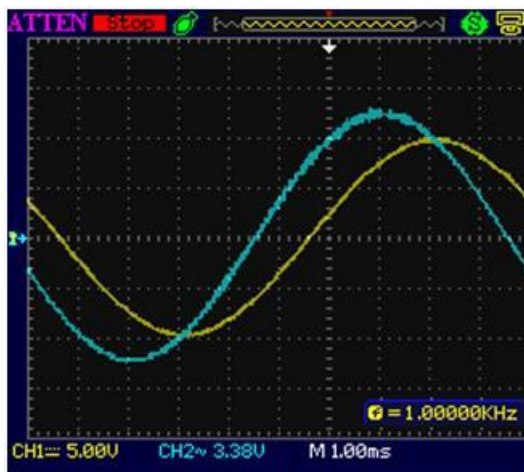
Figura 61 – Circuito RC

Os valores medido são mostrados na tabela 05.

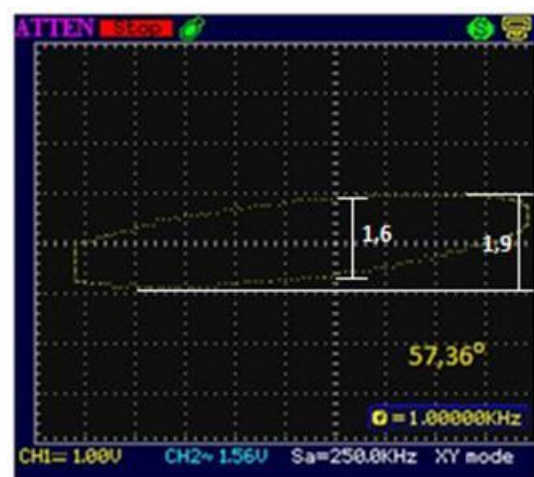
**Tabela 5 – Relação XY no osciloscópio**

Capacitância	X	Y	$\Delta\theta$ (GRAUS)	Fator de Potência (Cos $\theta$ )
0%	1,6	1,9	57,36	0,53
25%	1,4	5,5	14,74	0,96
50%	0,9	5,6	9,24	0,98
75%	0,7	5,7	7,05	0,99
100%	0,4	5,7	4,02	0,99

Observa-se que o ângulo de defasagem entre as ondas varia proporcionalmente à variação do capacitor, conforme pode se observar no seqüência das figuras 62 a 67.



**Figura 62– Defasagem das ondas**



**Figura 63 – Capacitor aberto 100%**



Figura 64 – Capacitor aberto 75%



Figura 65 – Capacitor aberto 50%



Figura 66 – Capacitor aberto 25%



Figura 67 – Capacitor fechado

## 5 CONCLUSÃO

A construção do capacitor atendeu as especificações de projeto. Para condição capacitor fechado o mesmo apresentou uma capacitância de 6,909 nF e um fator de qualidade medido de 15,24.. Apresentando um erro mensurável de 0,92% entre o valor medido e calculado para a capacitância máxima. Para o capacitor aberto tem-se uma capacitância de 171,8  $\mu$ F.

Para tensões de até 1000V o capacitor pode ser utilizado em qualquer capacitância, e para a tensão de 2500 V para capacitâncias de até 6,4 nF, sendo desta forma adequado para o uso em experimentos de eletricidade.

O transitório de carga do capacitor pode ser avaliado, respondendo com uma constante de decaimento estimada em  $\zeta=1,75$  us.

A avaliação do comportamento do capacitor permitiu a visualização tanto em alta como em baixa frequência, tendo o comportamento de curto circuito a partir de 4,5 KHz.

O valor do tempo de carga é estimado em 16,05ms desta forma a constante de tempo é estimada no valor de 3,6ms, e o valor para a descarga é de 3,6ms, permitindo desta forma o estudo de circuitos em CC.

Quando ligado na rede elétrica pode-se visualizar o comportamento do capacitor, apresentando um comportamento linear com coeficiente de representatividade ( $R^2$ ) de 98,69 %.

O fator de potência variou entre 0,53 e 0,99, basendo-se no método de lisoujuss, sendo este um método mais preciso para esse tipo de medição com o uso do osciloscópio. Essa variação pode mudar com o uso de cargas indutivas diferentes.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BALBINOT, Alexandre; BALBINOT, Valner João Brusamello. **Instrumentos e Fundamentos de Medidas**. Rio de Janeiro: LTC, 2006. Vol 1

DUPONT. **Tecnical Data and Specs** . Disponível em: [http://www.polyesterconverters.com/pcl\\_specs/dupont/melinex/Melinex226\\_1.htm](http://www.polyesterconverters.com/pcl_specs/dupont/melinex/Melinex226_1.htm). acesso em 28/03/2013.

FOWLER, R. J.; **Eletricidade, Princípios e Aplicações – volume 1 e 2**”, Editora Mac Graw Hill, 1992.

FLUKE, **For predictive maintenance, reach for a 5 kV tester**. Disponível em: [http://www.fluke.com/fluke/ptpt/support/appnotes/default.htm?category=AP\\_INSUL](http://www.fluke.com/fluke/ptpt/support/appnotes/default.htm?category=AP_INSUL). Acesso em 28/03/2013.

GILLIES, Robert B. **Instrumentation and measurements for electronic technicians**, 2a edição, Prentice Hall, 1993.

HALLIDAY, D., RESNICK, R., WALKER, J. **Fundamentals of physics – Extended with modern physics**. New York: John Wiley, 1993.

HALLIDAY, David; RESNICK, Robert; WALKER, Jearl. **Fundamentos de Física**. 7ª. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 2007. Vol.3.

MARTIGNONI, A. **Eletrotécnica**, ,5a edição, Editora Globo,1978.