



**Universidade Federal de Itajubá**  
**Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica**

# **Desenvolvimento de um sistema on-line de monitoramento de entreferro utilizando sensores capacitivos**

*JOSÉ RENATO CASTRO MILANEZ*

Dissertação apresentada ao Programa de  
Pós-Graduação em Engenharia Elétrica  
da Universidade Federal de Itajubá como  
requisito parcial para obtenção do título de  
Mestre em Engenharia Elétrica.

**Orientador: Prof. Dr. Edson da Costa Bortoni**

Itajubá

2006

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Mauá –  
Bibliotecária Margareth Ribeiro- CRB\_6/1700

M637d

Milanez, José Renato Castro

Desenvolvimento de um sistema on-line de monitoramento de  
entreferro utilizando sensores capacitivos / José Renato Castro

Milanez. -- Itajubá (MG) : [s.n.], 2006.

158 p. : il.

Orientador : Prof. Dr. Edson da Costa Bortoni.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Itajubá.

1. Monitoramento on-line. 2. Entreferro. 3. Sensores capacitivos. I. Bortoni, Edson da Costa, orient. II. Universidade Federal De Itajubá. III. Título.

CDU 681.5(043)

## Dedicatória

Ao meu avô, Orlando,  
que faleceu antes de ter  
orgulho do trabalho de seu neto.

## **Agradecimentos**

À minha família e à minha namorada Simone, que torceram por mim a cada dia de trabalho consumido para atingir este objetivo.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Edson da Costa Bortoni, por me orientar de forma excepcional para que o trabalho atingisse o melhor resultado possível.

Aos amigos Pedro Henrique Guedes Carvalho e Victor Andrade Nunes pelas ajudas prestadas na parte experimental deste trabalho.

À empresa SISVÔO pela ajuda prestada na confecção dos medidores de capacitância.

# Índice

Dedicatória .....	3
Agradecimentos .....	4
Índice .....	5
Lista de tabelas .....	7
Lista de figuras .....	8
Resumo .....	12
Abstract.....	13
1 Introdução.....	14
2 Revisão bibliográfica.....	17
2.1 Monitoramento de máquinas rotativas .....	17
2.1.1 Monitoramento de descargas parciais.....	17
2.1.2 Monitoramento de enrolamentos .....	18
2.1.3 Monitoramento de faltas.....	19
2.1.4 Elevação de temperatura.....	19
2.1.5 Análise de vibração .....	20
2.1.6 Simulações, softwares e novas tecnologias .....	21
2.2 Monitoramento do entreferro .....	23
2.2.1 Causas de deformidade.....	24
2.2.2 Métodos para a medição do entreferro .....	26
2.2.2.1 Sensores acústicos .....	26
2.2.2.2 Sensores de fibra óptica.....	27
2.2.2.3 Simulação .....	27
2.2.2.4 Sensores capacitivos.....	30
3 Desenvolvimento de capacitores planos.....	35
3.1 O circuito impresso flexível .....	35
3.2 Classificação dos circuitos impressos flexíveis.....	36
3.2.1 Classe I: face simples .....	36
3.3 A capacitância entre condutores adjacentes .....	38
3.3.1 Exemplo de um projeto utilizando a capacitância entre condutores adjacentes .....	41
3.4 Medidas de capacitância.....	45

3.4.1	Ponte Sauty .....	48
3.4.2	Ponte Wien .....	48
3.4.3	Medição por rampa de subida.....	49
3.4.4	Medição por diferenças .....	52
3.5	Projeto e análise dos capacitores planos.....	54
3.5.1	Projeto.....	54
3.5.2	Análise.....	57
4	Modelagens matemáticas.....	64
4.1	Modelagem matemática do rotor .....	64
4.2	Modelagem matemática do estator .....	72
4.3	Determinação dos raios do rotor e estator .....	80
5	Implementação do sistema.....	83
5.1	Projeto do medidor de capacitância.....	83
5.2	Avaliação do medidor de capacitância .....	87
5.3	Instalação do sistema e coleta de dados .....	89
5.4	Análise dos dados .....	99
5.4.1	A deformidade do rotor .....	99
5.4.2	Oscilação do entreferro do rotor.....	103
6	Conclusões e recomendações .....	106
	Referências Bibliográficas.....	108
	Anexos.....	112
	Anexo I – Capacitores projetados.....	113
	Anexo II – Medidas por rampa de subida.....	117
	Anexo III – Código fonte para determinação do rotor .....	129
	Anexo IV – Código fonte para determinação do estator .....	135
	Anexo V – Código fonte adicional para determinação do rotor.....	140
	Anexo VI – Código fonte adicional para determinação do estator.....	143
	Anexo VII – Código fonte para análise do gerador 2.....	146
	Anexo VIII – Código fonte para a determinação da oscilação do entreferro do rotor .	154

## Lista de tabelas

Tabela 1 – Causas de vibração em motores de indução .....	29
Tabela 2 – Valores típicos para a produção de circuitos impressos rígidos .....	42
Tabela 3 – Valores comparativos entre circuitos impressos rígidos e flexíveis.....	42
Tabela 4 – Materiais disponíveis para a produção dos capacitores planos .....	55
Tabela 5 – Medidas mínimas possíveis para a produção dos capacitores planos.....	55
Tabela 6 – Medidas dos capacitores produzidos com espessura mínima de 0,035 (mm) .....	56
Tabela 7 – Valores calculados dos capacitores projetados.....	58
Tabela 8 – Valores dos capacitores medidos por rampa de subida .....	61
Tabela 9 – Valores calculados utilizando uma constante dielétrica média .....	62
Tabela 10 – Medidas hipotéticas de uma máquina síncrona de oito pólos salientes.....	66
Tabela 11 – Medidas do rotor de uma máquina síncrona de oito pólos salientes referenciadas ao estator .....	67
Tabela 12 – Medidas de uma máquina síncrona de oito pólos salientes referenciadas ao estator em coordenadas polares .....	68
Tabela 13 – Medidas de uma máquina síncrona de oito pólos salientes referenciadas ao estator em coordenadas cartesianas .....	69
Tabela 14 – Propriedades da circunferência do rotor calculadas pelo método MLS ....	81
Tabela 15 – Propriedades da circunferência do estator calculadas pelo método MLS ..	82
Tabela 16 – Descrição dos pinos do CAV424.....	84
Tabela 17 – Medidas obtidas de capacitores comerciais utilizando o medidor de capacitância .....	88
Tabela 18 – Características do gerador 2 .....	89
Tabela 19 – Medidas nominais do gerador 2.....	100
Tabela 20 – Medidas do gerador 2 .....	101
Tabela 21 – Propriedades da melhor circunferência do rotor do gerador 2 .....	102

## Lista de figuras

Figura 1 – Acelerômetro baseado em fibra óptica.....	20
Figura 2 – Causas dinâmicas que influem na variação do entreferro.....	25
Figura 3 – Estator com deformação devido à influência do efeito de magnetostricção. (esquerda) sem o efeito. (direita) com o efeito.....	26
Figura 4 – Sensor acústico instalado entre pólos.....	27
Figura 5 – Distribuição do fluxo magnético simulado. (esquerda) 25% de excentricidade no rotor para baixo. (direita) rotor sem excentricidade.....	28
Figura 6 – Excentricidade estática.....	29
Figura 7 – Excentricidade dinâmica.....	30
Figura 8 – Layout sugerido para melhorias em sensores capacitivos.....	31
Figura 9 – Resposta do sensor capacitivo.....	32
Figura 10 – Resposta linearizada do sensor capacitivo.....	32
Figura 11 – Saída bruta do sensor capacitivo de entreferro.....	33
Figura 12 – Reatâncias q e d determinadas.....	34
Figura 13 – Exemplo de um circuito impresso flexível.....	36
Figura 14 – Circuito impresso flexível classe Ia.....	37
Figura 15 – Circuito impresso flexível classe Ib.....	37
Figura 16 – Circuito impresso flexível classe Ic.....	38
Figura 17 – Circuito impresso flexível classe Id.....	38
Figura 18 – Capacitância distribuída entre condutores adjacentes.....	39
Figura 19 – Efeito típico de blindagem para condutores adjacentes: (a) sem blindagem, (b) blindagem periférica e (c) blindagem periférica e entre condutores.....	41
Figura 20 – Valores de capacitância para diferentes espaçamentos entre condutores no Fenolite FR2 com condutores de 0,035 (mm) de espessura.....	44
Figura 21 – Valores de capacitância para diferentes espaçamentos entre condutores no Fenolite FR2 com condutores de 0,5 (mm) de espessura.....	45
Figura 22 – Configuração básica de uma ponte de corrente alternada.....	46
Figura 23 – Configuração de uma ponte Sauty.....	48
Figura 24 – Configuração de uma ponte Wien.....	49
Figura 25 – Circuito de carregamento do capacitor.....	50
Figura 26 – Forma de onda da tensão sobre o capacitor durante seu carregamento.....	51



Figura 27 – Circuito interno do CAV424 e seus componentes externos.....	53
Figura 28 – Formas de onda dos sinais integrados.....	53
Figura 29 – <i>Layout</i> empregado nos capacitores planos.....	54
Figura 30 – Dois <i>layouts</i> diferentes.....	55
Figura 31 – Circuito para medição da capacitância por rampa de subida.....	57
Figura 32 – Bancada de medições com capacitor suspenso no ar (em detalhe).....	59
Figura 33 – Rampa de subida para o capacitor de 10 (mm) de largura por 100 (mm) de comprimento e espaçamento de 0,7 (mm).....	59
Figura 34 – Instalação do sensor de entreferro.....	65
Figura 35 – Instalação do sensor de rotação.....	65
Figura 36 – Circunferências de referência do rotor e estator em coordenadas cartesianas.....	66
Figura 37 – Medidas inseridas no plano cartesiano.....	69
Figura 38 – Polígono resultante da união das medidas inseridas no plano cartesiano ...	70
Figura 39 – Interpolação das medidas com spline.....	71
Figura 40 – Exemplo de sensor instalado na parede interna de uma máquina síncrona.	72
Figura 41 – Máquina síncrona com deformação no estator.....	73
Figura 42 – Posicionamento dos sensores no estator .....	74
Figura 43 – Nomeação dos pólos .....	75
Figura 44 – Eixo do rotor após rotação .....	75
Figura 45 – Sensores inseridos .....	78
Figura 46 – Circunferência real do estator .....	79
Figura 47 – Circunferência do rotor e seu centro calculados pelo método MLS .....	81
Figura 48 – Circunferência do estator e seu centro calculados pelo método MLS .....	82
Figura 49 – <i>Layout</i> final do circuito impresso do medidor de capacitância.....	86
Figura 50 – Vista superior do circuito impresso final .....	86
Figura 51 – Vista inferior do circuito impresso final .....	87
Figura 52 – Resposta do medidor de capacitância para quatro capacitâncias de referência CX1 diferentes.....	88
Figura 53 – Gerador 2 da PCH Luiz Dias .....	89
Figura 54 – Diagrama de instalação dos sensores no gerador 2.....	90
Figura 55 – Sensor capacitivo fixado na parede do estator .....	90
Figura 56 – Sensor capacitivo remanescente após período de fixação.....	91
Figura 57 – Terminais conectados no capacitor .....	92

Figura 58 – Detalhe da fixação do cabo blindado .....	92
Figura 59 – Detalhe do cabo fixado na armadura do gerador .....	93
Figura 60 – Sistema de aquisição de dados .....	93
Figura 61 – Dados coletados .....	97
Figura 62 – Diminuição do entreferro durante a partida da máquina.....	97
Figura 63 – Dados coletados em detalhe .....	98
Figura 64 – Detalhe dos máximos e mínimos do sinal aquisitado .....	99
Figura 65 – Apresentação de onze medidas de pólos.....	100
Figura 66 – Deformação do rotor do gerador 2 .....	101
Figura 67 – Melhor circunferência para o rotor do gerador 2 .....	102
Figura 68 – Circunferências com variação no entreferro do rotor do gerador 2 .....	103
Figura 69 – Ampliação das oscilações do rotor do gerador 2 .....	104
Figura 70 – Outra visualização da oscilação do rotor do gerador 2 .....	105
Figura 71 – Capacitores com trilhas condutoras de 10 (mm) de largura.....	113
Figura 72 – Capacitores com trilhas condutoras de 20 (mm) de largura.....	114
Figura 73 – Capacitores com trilhas condutoras de 30 (mm) de largura.....	115
Figura 74 – Capacitores com trilhas condutoras de 10 (mm) de largura, com <i>layout</i> em U e E.....	116
Figura 75 – Rampa de subida para o capacitor de 10 (mm) de largura por 100 (mm) de comprimento e espaçamento de 0,7 (mm).....	117
Figura 76 – Rampa de subida para o capacitor de 10 (mm) de largura por 100 (mm) de comprimento e espaçamento de 0,8 (mm).....	117
Figura 77 – Rampa de subida para o capacitor de 10 (mm) de largura por 100 (mm) de comprimento e espaçamento de 0,9 (mm).....	118
Figura 78 – Rampa de subida para o capacitor de 10 (mm) de largura por 150 (mm) de comprimento e espaçamento de 0,7 (mm).....	118
Figura 79 – Rampa de subida para o capacitor de 10 (mm) de largura por 200 (mm) de comprimento e espaçamento de 0,7 (mm).....	119
Figura 80 – Rampa de subida para o capacitor de 10 (mm) de largura por 250 (mm) de comprimento e espaçamento de 0,7 (mm).....	119
Figura 81 – Rampa de subida para o capacitor de 10 (mm) de largura por 300 (mm) de comprimento e espaçamento de 0,7 (mm).....	120
Figura 82 – Rampa de subida para o capacitor de 20 (mm) de largura por 100 (mm) de comprimento e espaçamento de 0,7 (mm).....	120

Figura 83 – Rampa de subida para o capacitor de 20 (mm) de largura por 100 (mm) de comprimento e espaçamento de 0,8 (mm).....	121
Figura 84 – Rampa de subida para o capacitor de 20 (mm) de largura por 100 (mm) de comprimento e espaçamento de 0,9 (mm).....	121
Figura 85 – Rampa de subida para o capacitor de 20 (mm) de largura por 150 (mm) de comprimento e espaçamento de 0,7 (mm).....	122
Figura 86 – Rampa de subida para o capacitor de 20 (mm) de largura por 200 (mm) de comprimento e espaçamento de 0,7 (mm).....	122
Figura 87 – Rampa de subida para o capacitor de 20 (mm) de largura por 250 (mm) de comprimento e espaçamento de 0,7 (mm).....	123
Figura 88 – Rampa de subida para o capacitor de 20 (mm) de largura por 300 (mm) de comprimento e espaçamento de 0,7 (mm).....	123
Figura 89 – Rampa de subida para o capacitor de 30 (mm) de largura por 100 (mm) de comprimento e espaçamento de 0,7 (mm).....	124
Figura 90 – Rampa de subida para o capacitor de 30 (mm) de largura por 100 (mm) de comprimento e espaçamento de 0,8 (mm).....	124
Figura 91 – Rampa de subida para o capacitor de 30 (mm) de largura por 100 (mm) de comprimento e espaçamento de 0,9 (mm).....	125
Figura 92 – Rampa de subida para o capacitor de 30 (mm) de largura por 150 (mm) de comprimento e espaçamento de 0,7 (mm).....	125
Figura 93 – Rampa de subida para o capacitor de 30 (mm) de largura por 200 (mm) de comprimento e espaçamento de 0,7 (mm).....	126
Figura 94 – Rampa de subida para o capacitor de 30 (mm) de largura por 250 (mm) de comprimento e espaçamento de 0,7 (mm).....	126
Figura 95 – Rampa de subida para o capacitor de 30 (mm) de largura por 300 (mm) de comprimento e espaçamento de 0,7 (mm).....	127
Figura 96 – Rampa de subida para o capacitor de 10 (mm) de largura por 250 (mm) de comprimento, espaçamento de 0,7 (mm) e <i>layout</i> em U.....	127
Figura 97 – Rampa de subida para o capacitor de 10 (mm) de largura por 250 (mm) de comprimento, espaçamento de 0,7 (mm) e <i>layout</i> em E.....	128

## Resumo

Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um sistema on-line de monitoramento de entreferro de máquinas síncronas de pólos salientes. O monitoramento do entreferro tem se mostrado cada vez mais uma necessidade, haja vista que a partir das informações obtidas determinam-se deformações na circunferência do rotor e do estator. A deformação da circunferência do rotor pode ser utilizada na determinação da sua excentricidade estática e dinâmica ou para a identificação de outras anomalias. A excentricidade no rotor é um fator importante na ocorrência de vibrações na máquina. A deformação do estator é utilizada para avaliar se o mesmo sofre ação de forças externas ou internas, como ação da compressão do concreto no qual a máquina está inserida. Para o sistema on-line de monitoramento de entreferro, foi desenvolvido um sensor capacitivo de medição de distância. O sensor capacitivo foi projetado com circuitos impressos flexíveis, que apresentam uma espessura muito fina, leveza e flexibilidade para se acomodar na parede interna do estator. Um medidor de capacitância baseado na medição por diferenças foi projetado e produzido como sugestão para a medição dos capacitores planos projetados. Foi desenvolvida uma modelagem matemática para a determinação da deformidade do rotor e estator. Apresentou-se também um método para a determinação do centro das circunferências. A implementação do sistema de monitoramento foi realizada no gerador dois da Pequena Central Hidrelétrica Luiz Dias, onde se obteve uma série de amostras que foram utilizadas para a determinação da deformação do rotor e estator.

## **Abstract**

This work presents the development of an on-line air-gap monitoring system for salient poles synchronous machines. Air-gap monitoring has becoming an important tool to determine deformations at the rotor and stator circumferences. The deformation of rotor circumference can be employed to determine its static and dynamic eccentricity or to identify other anomalies. The rotor eccentricity is an important factor in vibration occurrences at the machine. The stator deformation is employed to evaluate if the stator is suffering external or internal actions, like compression of the concrete where the machine is installed. To the on-line air-gap monitoring system, a capacitive sensor based on distance measurement was developed. The capacitive sensor was projected with flexible printed circuits, which have a very thin thickness, lightness and flexibility to fit at the internal stator wall. A capacitance meter based on measurement by differences was designed and produced as suggestion for measurement of the designed plane capacitors. A mathematic model was developed to determine the deformation of rotor and stator. Also, a method to determine the center of the circumferences was presented. The monitoring system implementation was done on the unit 2 at the Luiz Dias small hydro power plant and a series of measurements were done and employed to determine the deformation of rotor and stator.

# 1 Introdução

Atualmente existe a grande necessidade de diminuir os custos com a manutenção de máquinas rotativas através de manutenções preditivas. A manutenção preditiva é uma manutenção previamente estudada e programada, de forma que ocorre somente diante de sua necessidade, evitando custos desnecessários em função da parada da máquina. Quanto maior o grau de importância da máquina, o estudo de sua manutenção preventiva deve ser mais rigoroso.

Uma das ferramentas de manutenção que vem sendo empregada em máquinas síncronas de pólos salientes, utilizadas para a geração de energia elétrica, é o monitoramento do entreferro. O entreferro é o pequeno espaço compreendido entre a parede interna do estator e o pólo saliente presente no rotor. A variação desta grandeza está relacionada a vários fatores, como desbalanceamento do rotor e dilatações. Uma ocorrência muito danosa em hidrogenadores é, por exemplo, o roçamento do pólo saliente na parede interna do estator.

As paradas para a manutenção, além de apresentarem custos diretos, apresentam ainda os custos indiretos, relacionados com a perda de geração de energia e de parcela variável junto ao operador do sistema e de agências reguladoras. A fim de prevenir este e outros problemas, o monitoramento do entreferro tem se mostrado uma ferramenta essencial.

Para a manutenção preditiva, o monitoramento do entreferro deve ser on-line e contínuo, com o armazenamento das medidas para a análise de tendência da variação do entreferro ao longo do tempo. Com o estudo da tendência, pode-se programar a parada da máquina para manutenção corretamente, evitando custos desnecessários.

São ainda características desejáveis de um sistema de monitoramento on-line:

- **Baixo custo:** o sistema deve ser econômico na sua instalação e manutenção.
- **Fácil implantação:** o sistema deve ser de fácil instalação nas máquinas já existentes, sem a necessidade de intervenções especiais para acomodar os sensores.
- **Transparência:** o sensor deve ser transparente para a máquina, não interferindo em sua operação.

Portanto, o desenvolvimento de um sistema on-line de monitoramento de entreferro necessita de:

- **Sensor:** para determinar o tamanho do entreferro, um sensor deve ser utilizado. Neste trabalho, será apresentado o projeto um sensor capacitivo, baseado no princípio da variação da capacitância entre condutores adjacentes, presentes em um circuito impresso flexível. O sensor capacitivo, fixado na parede interna do estator, é transparente para a máquina e sua operação independe de sujeiras como óleo e pó.
- **Medidor:** para determinar a variação da capacitância no sensor, é necessário um medidor de capacitância. Neste trabalho, será apresentado o projeto de um medidor de capacitância, cujo princípio de medição é baseado na diferença de capacitância entre dois elementos. O medidor é projetado somente com um circuito integrado e alguns resistores e capacitores, buscando um baixo custo.
- **Sistema de aquisição de dados:** para a análise dos dados, é necessário capturá-los para o computador através de um sistema de aquisição de dados. Neste trabalho o sistema será composto por um *notebook*, uma placa de aquisição de dados com 16 bits de resolução e um software de captura.
- **Software específico:** com os dados capturados, é necessário um software capaz de analisá-los e apresentar informações sobre o comportamento do entreferro ao longo do tempo. Neste trabalho, foi desenvolvido um código fonte para o software MATLAB a fim de determinar graficamente as deformidades na circunferência do rotor e do estator. Adicionalmente, foi desenvolvido um método para determinar o centro das circunferências.

Esta dissertação é dividida em seis capítulos, sendo este o primeiro, introdutório. No Capítulo 2 faz-se uma extensa revisão bibliográfica dos temas relacionados ao monitoramento de máquinas. Para tanto, faz uma revisão de publicações relevantes relacionadas ao monitoramento de descargas parciais, condição de enrolamentos, faltas elétricas e mecânicas, elevação de temperatura, níveis de vibração, focando, sobretudo, no monitoramento das dimensões do entreferro.

O Capítulo 3 trata do desenvolvimento de capacitores planos, sensores capacitivos, condicionamento e aquisição de sinais. Neste caso desenvolveu-se uma

pesquisa sobre quais seriam os materiais mais adequados à construção dos sensores capacitivos focando, principalmente, a facilidade de instalação em unidades geradoras. Modelos teóricos foram desenvolvidos e confrontados com levantamentos realizados em laboratório.

No Capítulo 4 desenvolvem-se as expressões que permitem avaliar a geometria de estatores e rotores de geradores a partir de informações coletadas através dos sensores desenvolvidos no capítulo anterior.

O Capítulo 5 trata do estudo de caso através da implementação de todo o sistema, desde o projeto dos sensores capacitivos, passando pelo desenvolvimento do sistema de condicionamento e aquisição de sinais, até a sua instalação em campo, na segunda unidade geradora da PCH Luiz Dias. Com os dados aquisitados, foram determinadas a deformidade do rotor e a oscilação do entreferro do gerador.

No Capítulo 6 tecem-se as principais conclusões do trabalho desenvolvido, bem como são elaboradas propostas de desenvolvimentos futuros no que diz respeito ao monitoramento de entreferro empregando-se sensores capacitivos.

Adicionalmente, apresentam-se as referências bibliográficas citadas neste trabalho acompanhadas de uma série de anexos que contemplam o projeto dos sensores capacitivos desenvolvidos, resultados das medições usando a técnica de rampa de subida, bem como os códigos fontes das rotinas desenvolvidas para as análises.



## **2 Revisão bibliográfica**

### **2.1 Monitoramento de máquinas rotativas**

O monitoramento de máquinas rotativas tem sido utilizado para verificar as suas condições durante a operação e fornecer importantes informações sobre o equipamento a fim de dar suporte à manutenção, auxiliando à tomada de decisão, evitando medidas e paradas desnecessárias que podem acarretar em prejuízos financeiros.

Vários tipos de monitoramento têm sido empregados, dentre os quais se podem destacar o monitoramento de descargas parciais, condição de enrolamentos, faltas elétricas e mecânicas, elevação de temperatura, níveis de vibração e dimensões do entreferro.

Além dos métodos baseados em medição direta, existem ainda os que se baseiam em modelagens e simulações dessas características, permitindo a criação de softwares específicos e a utilização de novas tecnologias na área de monitoramento.

Uma revisão dos métodos atualmente empregados é apresentada a seguir.

#### **2.1.1 Monitoramento de descargas parciais**

O monitoramento das descargas parciais é uma maneira de se avaliar a condição do isolamento do enrolamento do estator de uma máquina. Segundo Lloyd et alii (1999), ao monitorar as descargas parciais, deve-se levar em consideração a influência da umidade, temperatura, tensão dos terminais e condição de carga.

No entanto, em locais onde as máquinas sofrem manutenções periódicas, fica difícil conjugar o monitoramento de descargas parciais com as condições exógenas ideais para o seu aparecimento.

Neste sentido, o trabalho descreve o desenvolvimento de um sistema automático de monitoramento de descargas parciais, utilizando sensores instalados na máquina rotativa, sendo configurado para realizar medições somente quando boas condições para o monitoramento forem encontradas. São apresentados também alguns resultados para 30 hidrogeradores avaliados.

A descarga parcial é um sintoma de deterioração do isolamento do enrolamento do estator na maioria das máquinas com tensão de geração maior do que 6 (kV) (Tetrault et alii, 1999). No entanto, como os benefícios do monitoramento de descargas parciais já são amplamente conhecidos, é sugerido o teste em máquinas de 4 (kV). O mesmo trabalho discute as razões teóricas que podem limitar o monitoramento em máquinas de 4 (kV), baseado em extensivos testes realizados de maneira on-line e off-line.

Nos testes off-line, constatou-se que realmente as descargas parciais ocorrem. Nos testes on-line, que foram realizados em 10 máquinas de 4 (kV) durante dois anos, foi detectado que as descargas parciais ocorreram em um pequeno período de tempo anterior à falha. É então sugerido um sistema de monitoramento contínuo de baixo custo para as máquinas.

Gross (2002) apresenta a determinação das descargas parciais através dos sinais de alta frequência gerados pelas descargas. Devido a problemas como a falta de combinação das impedâncias e outros, a aplicação de diferentes faixas de frequência para os testes de descargas parciais acaba sendo afetada. Mesmo apresentando certa complexidade na análise, é avaliada a medição de descargas parciais em máquinas rotativas para altas frequências.

### **2.1.2 Monitoramento de enrolamentos**

Os enrolamentos de máquinas rotativas apresentam outros defeitos além das descargas parciais. Stone (1999) apresenta várias formas de monitoramento do enrolamento. É apresentada a necessidade de se utilizar um sistema de monitoramento on-line para monitorar sua qualidade, apresentando um sistema de monitoramento baseado na detecção do gás ozônio, temperatura e também descarga parcial. Após a análise dos três sistemas sugeridos, concluiu-se que a utilização conjunta dos três sistemas praticamente eliminou todas as falhas inesperadas.

O trabalho de Smith (1999) atribui aos curtos-circuitos nos enrolamentos, a elevação da temperatura em regiões distintas do estator. Constatou-se que essa elevação de temperatura causou uma expansão desigual no estator, gerando uma vibração na máquina. Para analisar os curtos-circuitos, é proposto então um algoritmo que analisa a medida de tensão proveniente de uma bobina instalada no entreferro da máquina.

### **2.1.3 Monitoramento de faltas**

Para a prevenção de faltas, apresenta-se um método de monitoramento chamado Vienna (Wieser et alii, 1998). Sua imunidade a ruídos e sua alta sensibilidade é comprovada através de simulações e resultados experimentais utilizando um acionamento IGBT industrial. A técnica do método Vienna é baseada em modelos de máquinas em tempo real, que recentemente, têm sido usados somente em sistemas avançados de controle de máquinas. No entanto, a comparação entre dois modelos de máquinas também apresenta uma análise compreensiva das faltas.

### **2.1.4 Elevação de temperatura**

O monitoramento da temperatura das máquinas rotativas é uma grande necessidade, pois o aumento da temperatura degrada os componentes orgânicos utilizados no isolamento do enrolamento do estator.

A possibilidade de utilizar uma estimativa da resistência do estator para a determinação da resistência dos seus enrolamentos é apresentada por Sang-Bin et alii (2002). São discutidas as vantagens do monitoramento da temperatura sobre os modelos térmicos convencionais aplicados, além de investigar as estimativas já existentes da resistência do estator. É mostrado que a estimativa é difícil em operações em alta velocidade devido à sensibilidade aos parâmetros elétricos das máquinas, que se alteram com o aumento da frequência. O artigo propõe um novo método para estimar a resistência durante o regime permanente da máquina, cuja eficiência é comprovada através de dados experimentais.

Outro artigo sugere o monitoramento da temperatura através de um sistema de aquisição de dados com análise dos resultados (Lennon Jr., 1990). São monitoradas simultaneamente, quatro usinas hidrelétricas instaladas no Rio Colorado, utilizando RTDs instalados em 29 máquinas, totalizando 1600 canais de dados. Os dados coletados são enviados para uma central, localizada em uma das usinas para análise e backup.

### 2.1.5 Análise de vibração

A vibração em uma máquina rotativa, se não for solucionada, pode causar danos irreparáveis. Laggan (1999) apresenta uma visão geral a respeito de vibrações e suas características, bem como fatores que a geram. São apresentadas também técnicas de medição com o uso de transdutores de velocidade, acelerômetros e sondas de proximidade. A análise dos dados é sugerida por duas normas:

- **ISO 10816:** Medidas de vibração em partes não rotativas.
- **ISO 7912-2:** Medidas de vibração em partes rotativas.

Também são apresentadas formas de visualização dos dados, como os diagramas de Bode e tendência, além da visualização da órbita e espectros de frequência.

Para o monitoramento da vibração, Lopes-Hignera et alii (1997) apresentam a implantação de um acelerômetro baseado em fibra óptica para máquinas de grande porte. O sensor criado é otimizado para a detecção de vibrações na faixa de frequência de 0,2 a 140 (Hz), com uma mínima detecção de aceleração de 0,025 ( $m/s^2$ ) e com baixa sensibilidade transversal. Todo o princípio de operação do sensor é apresentado, juntamente com os aspectos construtivos e condicionamento de sinais. O sensor desenvolvido é robusto, barato e compacto. Seu tamanho pode ser comprovado na Figura 1 (Lopes-Hignera et alii, 1997).

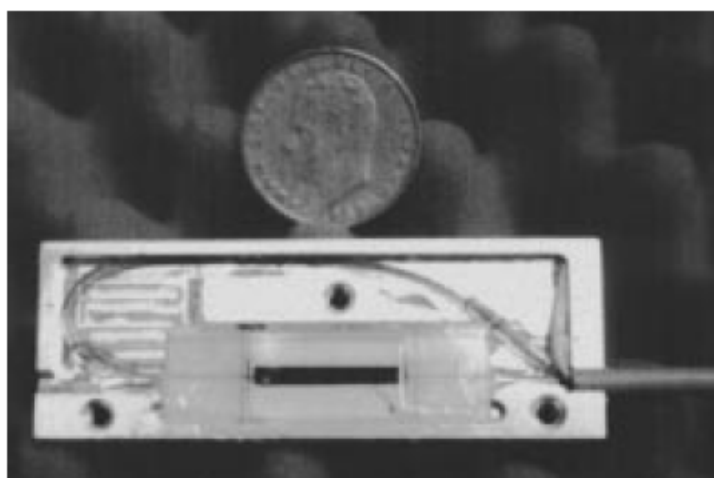


Figura 1 – Acelerômetro baseado em fibra óptica

O desempenho do sensor foi analisado em laboratório e em um grande gerador, tendo sua eficácia comprovada.

Uma comparação entre o monitoramento on-line e off-line é feita por Mahalungkar e Ingram (2004). Dois estudos de caso são apresentados para justificar os custos de implantação e manutenção do sistema on-line em uma indústria.

Fortin e Duffeu (1997) apresentam a história de dois grandes incidentes com geradores de usinas nucleares ocorridos na França. Tal acontecimento levou a uma grande ação a fim de prevenir este tipo de acidente, motivando a melhoria dos estudos sobre monitoramento on-line de vibração de geradores. Os dados obtidos com os sistemas de monitoramento já instalados motivaram o estudo de um novo método, que foi analisado e teve sua eficácia comprovada.

O processamento de sinal também é fonte de pesquisas na área de vibração. A separação de fontes cegas (*blind source separation - BSS*) sugerida em (Gelle et alii, 2003) é um método de processamento de sinal que consiste em recuperar, de um conjunto finito de medidas feitas por sensores, as contribuições de diferentes fontes físicas independentes do meio de propagação e a priori, sem nenhum conhecimento das fontes. Através de dados experimentais, utilizando dois motores fixados na mesma estrutura e com potências e velocidades diferentes, foi possível extrair os ruídos mútuos gerados na medida de cada motor. Assim, cada motor pode ser analisado sem intervenção do outro. É sugerido no artigo, o aprofundamento do estudo do método BSS para utilizá-lo em mais de duas fontes. Também, é sugerida a generalização do método BSS para influências não-lineares, a fim de analisar modelos físicos mais complicados.

### **2.1.6 Simulações, softwares e novas tecnologias**

A fim de se reduzir os custos com monitoramento, mais recentemente, tem surgido propostas de obtenção de características físicas a partir de simulações empregando modelos matemáticos.

Um modelo de simulação para máquinas rotativas sem escovas, é desenvolvido e validado por Haskew et alii (1996). Para a simulação, é utilizando o filtro adaptativo Kalman, que é devidamente apresentado. O modelo é criado para a análise de curto-circuito e circuito aberto dos enrolamentos do estator e fluxo no entreferro e comparado

com dados obtidos em laboratório. Os dados foram concisos e os autores sugerem a implementação do filtro em processadores digitais de sinais para o uso em tempo real.

O monitoramento on-line de máquinas rotativas é possível de ser realizado em conjunto com o uso de softwares para a análise dos dados. Artioli et alii (2004) apresentam um software de uso geral para o tratamento de sinais dirigido para o diagnóstico de máquinas elétricas. O software analisa os sinais no domínio do tempo e da frequência, além de possibilitar a troca de informações e consulta de dados experimentais via rede. Há então um compartilhamento dos dados pelos usuários do software.

Como principais características, o software apresenta uma interface amigável para o usuário, baixa manutenção do código fonte e modularidade para integração de novas ferramentas de análise. Para comprovar a eficiência do software, foram realizadas experiências com motores de indução trifásicos.

Com o advento de novas tecnologias inseridas no mercado, novos trabalhos têm sido realizados a fim de beneficiar o monitoramento de máquinas rotativas. Uma proposta de uso de PDAs (*personal data assistants*) para o monitoramento de máquinas é feita em (Tansel et alii, 2004). Nesta proposta, sugere-se que o monitoramento dos parâmetros seja realizado por um computador central, com grande capacidade de processamento e armazenamento. Tal central, após análise dos dados, fornecerá os dados requisitados pelos operadores através do envio, sem fio, dessas informações para os PDAs. O operador poderá então, enviar informações e comandos ao computador central para realizar operações nos equipamentos monitorados. Dois grandes problemas estão envolvidos: os custos de implantação desse sistema e as limitações dos PDAs. Os PDAs apresentam uma pequena tela, que na maioria das vezes não permite uma boa visualização de imagens e gráficos. Portanto, um modelo de envio de informações via página de Internet foi testado e mostrou-se eficaz.

Ao invés de transmitir as informações dos sensores, através de cabos, pode-se transmiti-las sem fio (Tiwari et alii, 2004). Em ambientes onde não se pode ter acesso com cabos, o uso de sensores sem fio torna-se uma opção atrativa. Por outro lado, os sensores sem fio possuem várias limitações técnicas: limitação de energia e memória, poder de processamento, velocidade de transmissão de dados, sincronização e robustez na operação. A fim de melhorar as limitações, o artigo apresenta uma nova abordagem para esses sensores: uma nova plataforma de hardware, arquitetura de rede e um

protocolo de acesso ao meio para a rede. A nova abordagem é implementada e testada para a verificação da sua funcionalidade.

## **2.2 Monitoramento do entreferro**

A principal motivação para a realização deste trabalho foi o monitoramento do entreferro. O entreferro é a distância compreendida entre o rotor e o estator de uma máquina rotativa, e seu monitoramento previne diversas falhas como o roçamento entre rotor e estator, análise de vibração e desbalanceamento.

Pollok e Lyles (1992) classificam o monitoramento do entreferro em duas categorias:

- **Monitoramento off-line:** o monitoramento *off-line*, ou estático, do entreferro é realizado com a máquina fora de funcionamento. Os dados obtidos são limitados, pois o entreferro de uma máquina rotativa é diferente quando está parada e quando está em funcionamento.
- **Monitoramento on-line:** o monitoramento *on-line*, ou dinâmico, do entreferro é um monitoramento realizado durante qualquer modo de operação da máquina. Todos os dados obtidos durante o monitoramento são comparados ao longo do tempo a fim de verificar qual será a tendência na variação do entreferro. Assim, é possível prever futuros defeitos.

O trabalho apresenta, ainda, um caso real ocorrido com a empresa Ontario Hydro, que após a ocorrência de roçamentos em cinco hidrogeradores, adotou um sistema on-line de monitoramento de entreferro. No caso apresentado, quatro geradores sofreram pequenos danos, porém o quinto gerador foi seriamente danificado. Foram necessários grandes reparos que atingiram o valor de 50% de uma nova máquina. Além desse custo, houve o prejuízo pela perda de geração de 60 (MW) durante dois anos.

Outro caso ocorrido com hidrogeradores é apresentado em (Metzker et alii, 1999). Na usina hidrelétrica de Igarapava, houve o roçamento no hidrogerador dois, que levou a uma extensa e custosa parada para a manutenção. Com o ocorrido, rapidamente foi adquirido um sistema on-line de monitoramento de entreferro para todos os cinco hidrogeradores. Durante a instalação e teste do sistema de monitoramento, foi

descoberto que o hidrogerador quatro estava com uma deformidade e rapidamente foi iniciado o processo de manutenção. O prejuízo evitado com a detecção da deformidade no hidrogerador quatro já foi o suficiente para cobrir o investimento no sistema de monitoramento.

### 2.2.1 Causas de deformidade

O sistema on-line de monitoramento de entreferro, ao medir variações no entreferro, é capaz de detectar deformidades no rotor e no estator. Ao detectar a deformidade, investigam-se as causas da deformação e executam-se medidas corretas de manutenção.

As causas são divididas em duas categorias:

- ***Estática:*** as causas estáticas ocorrem sem o funcionamento da máquina. Por exemplo, uma máquina que possui o estator concretado, sofre deformações com a expansão do concreto.
- ***Dinâmica:*** as causas dinâmicas ocorrem durante o funcionamento da máquina.

Várias são as possíveis causas dinâmicas que levam à deformação do rotor e estator. Estas, em geral, são resultados de forças que atuam sobre a máquina, que podem ser de origem magnética, centrífuga, térmica, mecânica ou externa. A Figura 2 apresenta as causas dinâmicas, suas inter-relações e conseqüências (AGMS, 2002).



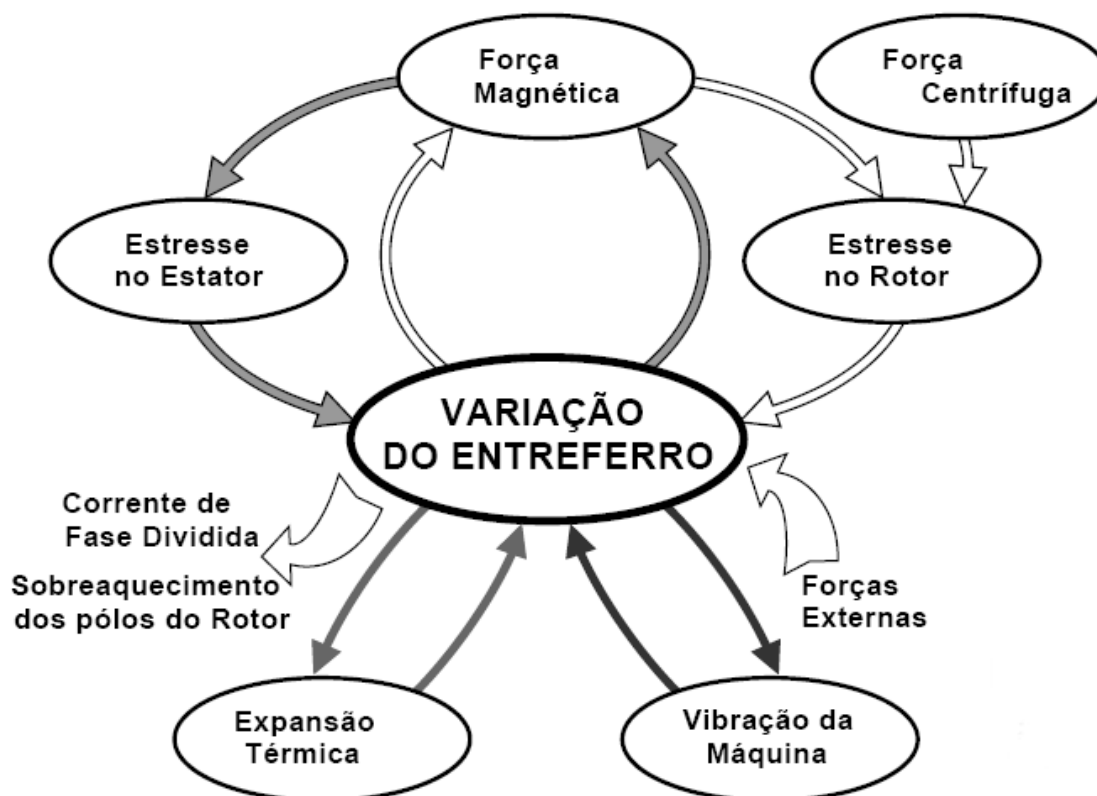


Figura 2 – Causas dinâmicas que influem na variação do entreferro

Mohammed et alii (2004) apresentam um estudo sobre o efeito inverso da magnetostricção na deformação do estator de máquinas rotativas. Este efeito ocorre porque as propriedades magnéticas dos materiais magnéticos são influenciadas por estresses mecânicos. As mudanças que ocorrem na propriedade de magnetização acarretam em mudanças na força magnética que atua no estator, como a magnitude e a distribuição. Por esta razão, os efeitos da magnetostricção são considerados como uma das principais causas de vibração e ruído da máquina rotativa. O artigo também propõe um método para a medição do efeito, juntamente com uma análise matemática e a aplicação do efeito na análise de um estator. Resultados desta análise são apresentados na Figura 3 (Mohammed et alii, 2004).

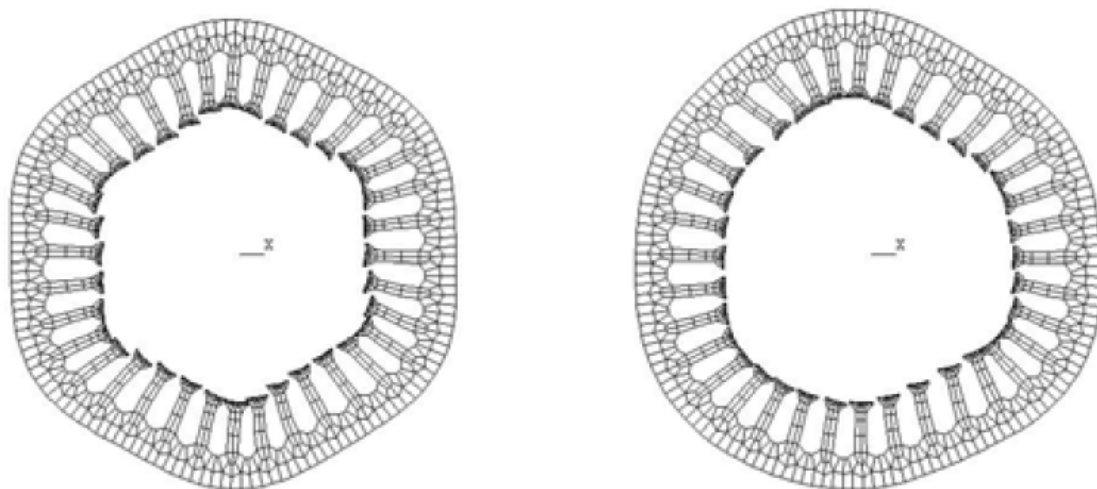


Figura 3 – Estator com deformação devido à influência do efeito de magnetostricção. (esquerda) sem o efeito. (direita) com o efeito

## 2.2.2 Métodos para a medição do entreferro

### 2.2.2.1 Sensores acústicos

É possível medir o entreferro utilizando sensores acústicos, conforme sugerido por Churchill et alii (1991). Os sensores acústicos são sensíveis a ruídos no entreferro, gerando um sinal que necessita de processamento especial a fim de extrair as informações desejadas. O sinal apresentado é acompanhado de vários outros ruídos, como a turbulência provocada pelo ar que refrigera a máquina. O sensor acústico é fixado entre dois pólos no rotor da máquina, e sua resposta é enviada via radiofrequência (RF). A Figura 4 apresenta a instalação deste sensor (Churchill et alii, 1991).

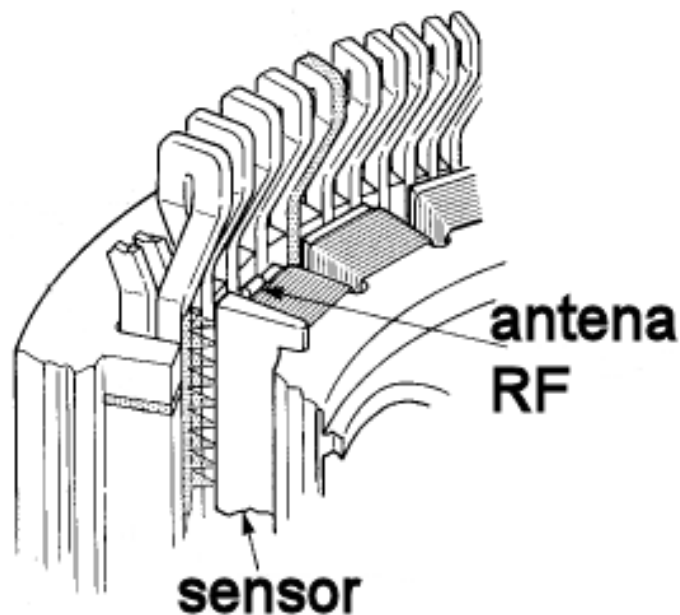


Figura 4 – Sensor acústico instalado entre pólos

### 2.2.2.2 Sensores de fibra óptica

O artigo (Pollock et alli, 1992) analisa um sistema on-line de monitoramento de entreferro que emprega a fibra óptica. O sistema de monitoramento por fibra óptica utiliza a técnica de triangulação para a medição, empregando dois sensores instalados no rotor e dois sensores instalados no estator. Assim, apresenta precisão melhor que 1% para entreferros com até 75 (mm).

### 2.2.2.3 Simulação

Vários trabalhos sugerem a simulação ao invés de medições do entreferro. O efeito da excentricidade dinâmica do entreferro no desempenho de máquinas síncronas de pólos salientes é apresentado em (Toliyat e Al-Nuaim, 1999). Neste caso, propõe-se o uso das correntes do estator para determinar a excentricidade, cujo método é chamado de MCSA (*motor current signature analysis*), ou análise da “assinatura” da corrente do motor. O MCSA é uma poderosa ferramenta de monitoramento tanto para a detecção de anomalias elétricas quanto mecânicas, válido tanto para a máquina quanto para a carga. É apresentado um modelo linear para máquinas síncronas baseado no layout físico e

geométrico de todos os enrolamentos. Com a análise desse modelo, as indutâncias são obtidas e comparadas com uma análise mais elaborada por elementos finitos. Ao criar um modelo para uma seção da máquina utilizando um software específico, obteve-se a distribuição do fluxo magnético, apresentada na Figura 5 (Toliyat e Al-Nuaim, 1999).

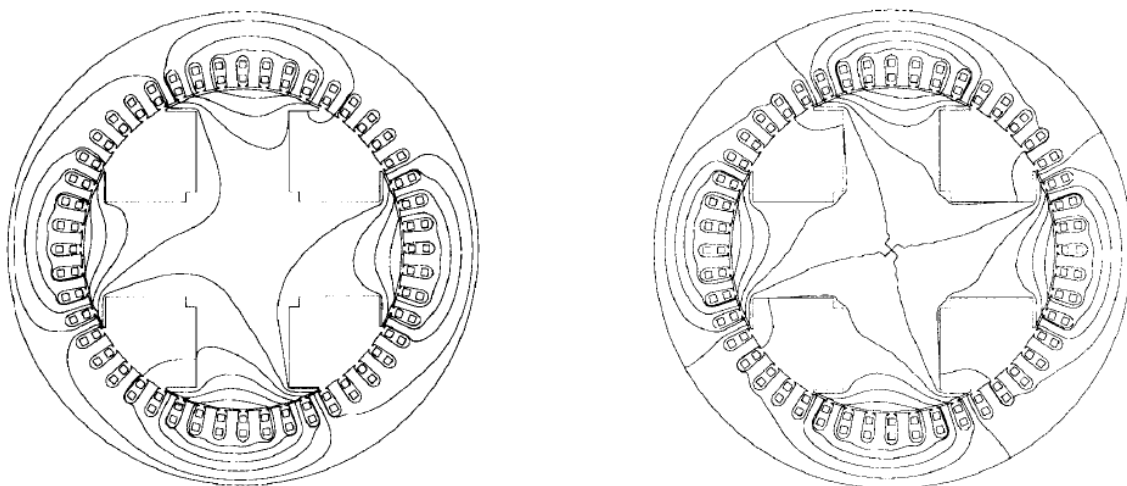


Figura 5 – Distribuição do fluxo magnético simulado. (esquerda) 25% de excentricidade no rotor para baixo. (direita) rotor sem excentricidade

A fim de comparar a simulação, realizou-se uma experiência que comprovou o rápido aumento das componentes harmônicas 17 e 19 do sinal da corrente de fase, assim como apresentado pela simulação.

Outro estudo analisa a vibração de uma máquina de indução, determinada por simulação utilizando o fluxo do entreferro (Hwang et alii, 2005). A vibração ocorre quando o comprimento do entreferro não é uniforme, fazendo com que a distribuição da tensão não seja uniforme também. Assim, a distribuição não uniforme da tensão afeta também as forças eletromagnéticas entre o rotor e estator, tornando-as diferentes. Os defeitos causados em máquinas pela vibração são apresentados na Tabela 1 (Hwang et alii, 2005).

Tabela 1 – Causas de vibração em motores de indução

<i>Causas</i>	<i>Taxa de ocorrência (%)</i>
Desbalanceamento do rotor	41
Instalação ou fixação incorreta	13
Falta de inércia no movimento de pistões	10
Fadiga ou desvios no eixo de rotação	9
Vibração natural devido a fricções	9
Combinação incorreta ou engrenagens defeituosas	8
Surtos ou pulsações de ar ou água	4
Impacto durante a operação, vibrações externas, etc.	6

A excentricidade do rotor devido ao seu desbalanceamento, que é a maior causa de vibrações, é dividida em excentricidade estática e dinâmica. A excentricidade estática ocorre quando rotor rotaciona em volta de seu eixo de rotação, porém o eixo de rotação é separado do eixo do estator, conforme a Figura 6.

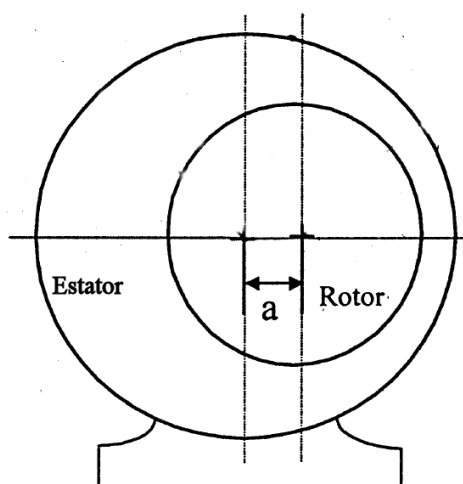


Figura 6 – Excentricidade estática

A excentricidade dinâmica ocorre quando o rotor rotaciona em torno do eixo do estator, mas a rotação é feita em torno do seu próprio eixo, conforme apresentado na Figura 7.

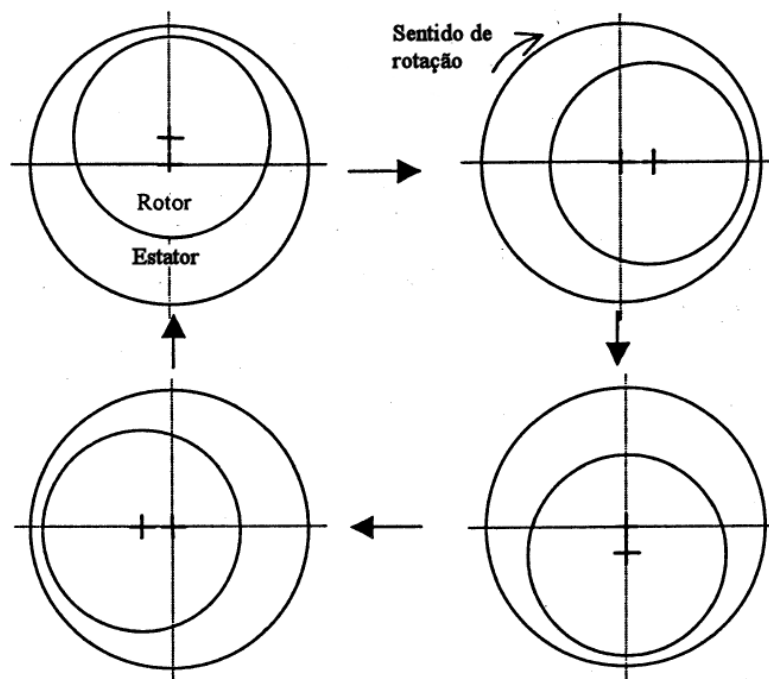


Figura 7 – Excentricidade dinâmica

Concluiu-se que no caso da excentricidade estática, a vibração ocorre sem variações no centro da circunferência do rotor e do estator, que causam a destruição do rotor.

Um estudo sobre a simulação dinâmica da excentricidade do entreferro para uma máquina de indução de gaiola é apresentado em (Joksimovic, 2005). O método é baseado na teoria de funcionamento do enrolamento, e a teoria é estendida para o caso do entreferro não uniforme. Um método para o cálculo de todas as indutâncias em uma máquina com excentricidade estática e dinâmica é apresentado juntamente com uma análise numérica de uma máquina real com seus parâmetros. A comparação entre a análise numérica e a simulação foi satisfatória.

#### 2.2.2.4 Sensores capacitivos

Os sensores capacitivos são robustos e sua resposta não é afetada pela presença de óleo, sujeira ou ventilação, sendo uma excelente opção para o monitoramento do entreferro.

Uma das pesquisas sobre sensores capacitivos sugere melhorias em sensores capacitivos para monitoramento do entreferro já comercializados no mercado (Drumm e

Hause, 2000). Para aumentar a resolução, é sugerido que o eletrodo primário seja fino e que se adicione um eletrodo de terra próximo ao eletrodo primário. Com essa medida, o sensor resultante terá muito mais resolução lateral espacial, porém com uma significativa redução no nível do sinal. O sensor projetado com o eletrodo primário em forma de tira obterá, de acordo com a largura da tira, um pulso de saída mais largo e com maior faixa de frequência. Mesmo assim, com maiores faixas de frequência e com uma redução do nível do sinal, é necessário um amplificador de sinal e redução de ruído, conseguidos através de equipamentos eletrônicos. O layout do sensor sugerido é apresentado na Figura 8 (Drumm e Hause, 2000).

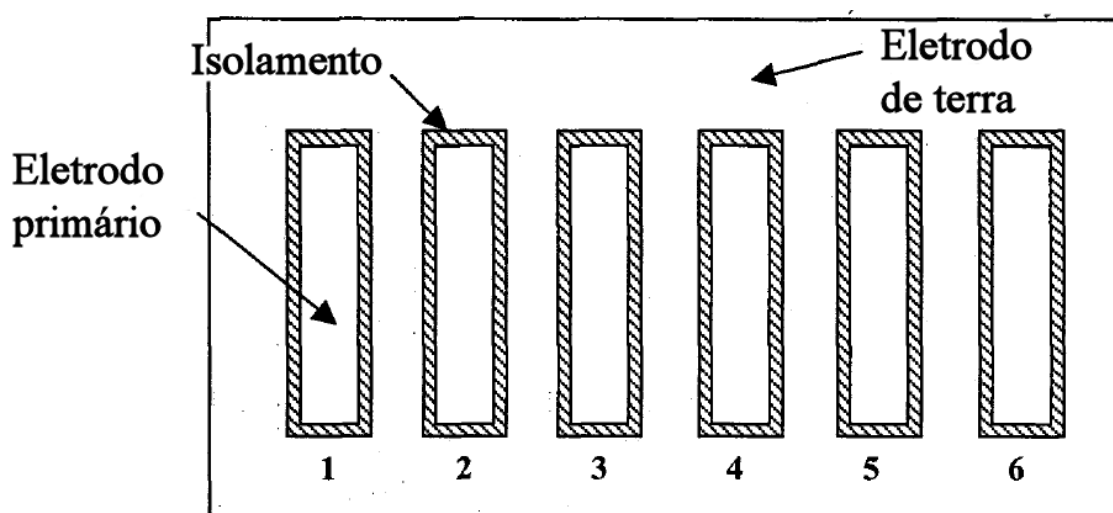


Figura 8 – Layout sugerido para melhorias em sensores capacitivos

Os sensores capacitivos são mais economicamente viáveis do que sensores baseados em fibra óptica (Pollock e Lyles, 1992). Seu funcionamento é baseado na capacitância entre o sensor e o pólo da máquina síncrona, cujo sinal resultante é inversamente proporcional à largura do entreferro. A Figura 9 representa a resposta do sensor (Pollock e Lyles, 1992).

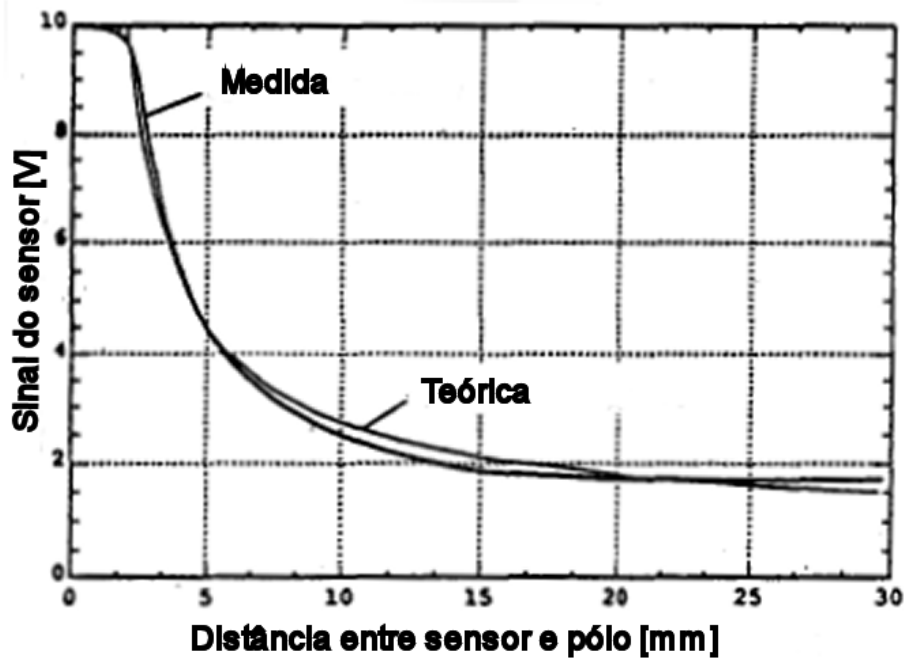


Figura 9 – Resposta do sensor capacitivo

Após linearizar a resposta do sensor capacitivo para fornecer o mínimo valor de entreferro em cada pólo, levando em consideração o formato do pólo, determina-se a Figura 10 (Pollock e Lyles, 1992).

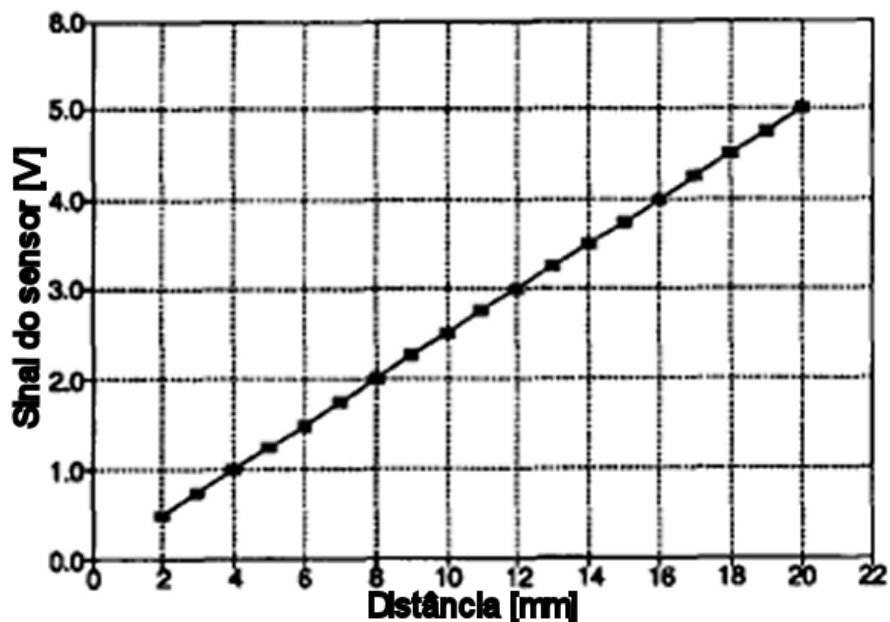


Figura 10 – Resposta linearizada do sensor capacitivo



Outro trabalho importante utilizando a análise dos dados obtidos através de um sensor capacitivo para o monitoramento on-line do entreferro, determina o ângulo de potência e as reatâncias síncronas de uma máquina síncrona de pólos salientes (Despalatovic et alii, 2004). A saída bruta do sensor capacitivo de entreferro utilizado no trabalho é representada pela Figura 11 (Despalatovic et alii, 2004).

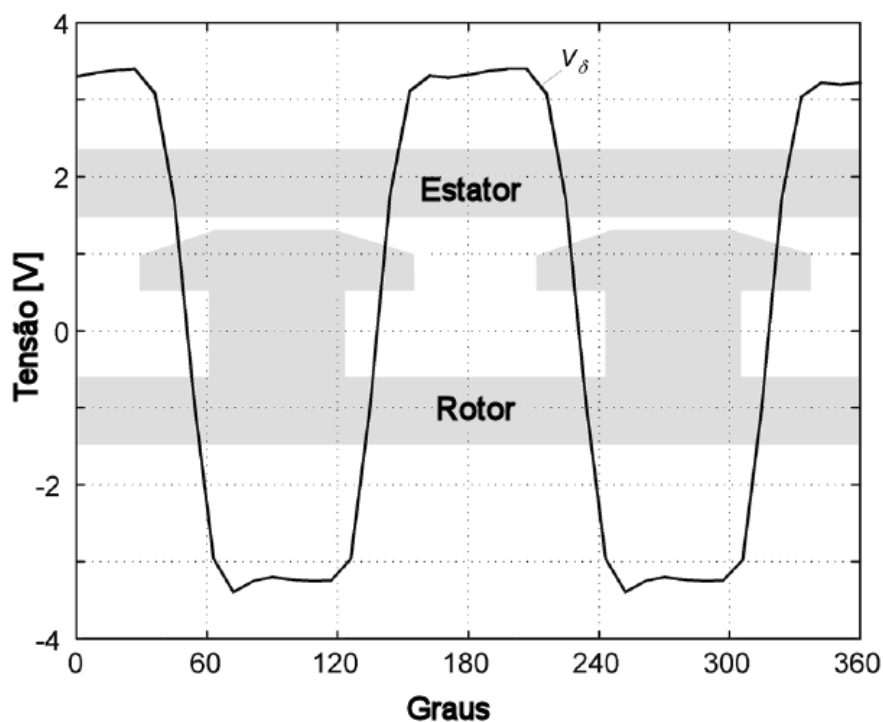


Figura 11 – Saída bruta do sensor capacitivo de entreferro

Ao analisar o sinal obtido do sensor, o valor máximo da componente fundamental corresponde à presença do eixo q da máquina, os autores utilizam esta informação para determinar o ângulo de carga e, por conseguinte, as reatâncias síncronas de eixo direto e de eixo em quadratura em diversas condições operativas, conforme mostra a Figura 12 (Despalatovic et alii, 2004).

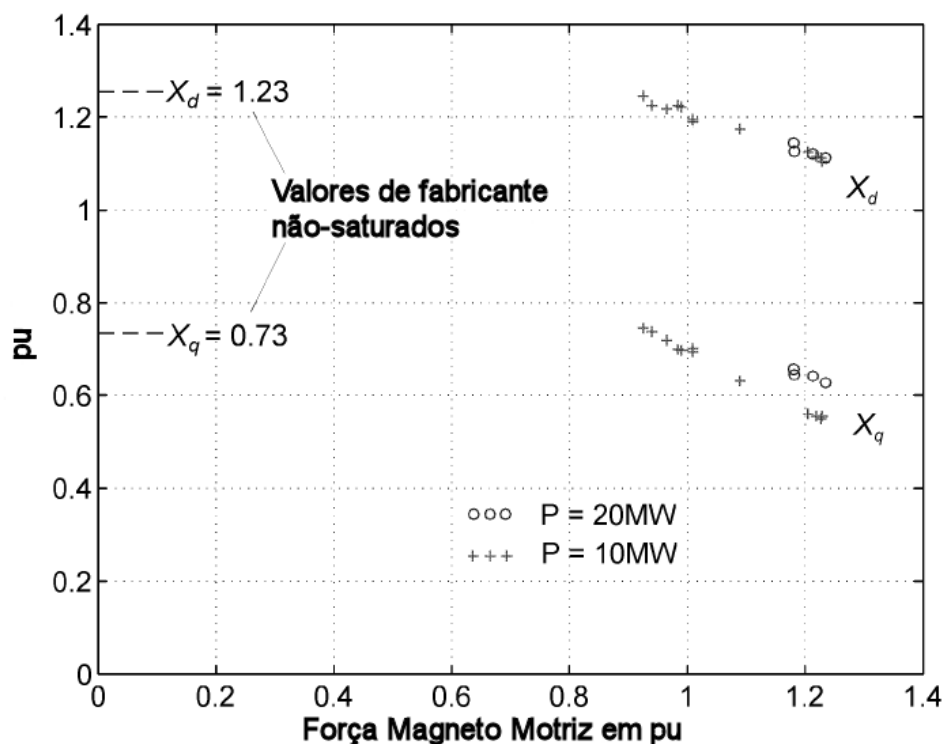


Figura 12 – Reatâncias q e d determinadas

O estudo realizado por (Zangl e Bretterkieber, 2004) apresenta uma abordagem para a melhoria da determinação da forma do rotor em função dos sensores capacitivos. De acordo com o artigo, a forma do rotor é um importante problema de precisão dos sensores capacitivos para a medição da posição linear e angular. Ao conhecer a relação entre o parâmetro de interesse e a capacitância informada pelo sensor, o parâmetro pode ser determinado. Porém, a relação inversa não pode ser determinada por uma simples capacitância, mas por um vetor de capacitâncias. Ao determinar a relação entre o parâmetro de interesse e a capacitância informada, pode-se avaliar a influência dos fatores presentes na capacitância, como tolerâncias dos componentes eletrônicos e presença de ruídos, na determinação da forma do rotor.

### **3 Desenvolvimento de capacitores planos**

Será apresentado neste capítulo o desenvolvimento de capacitores planos. Tais capacitores serão utilizados para detectar as variações na distância do entreferro de uma máquina síncrona.

Para servir a esta finalidade, primeiramente será apresentado o circuito impresso flexível. Na seqüência, será definida a capacitância entre condutores adjacentes, bem como a demonstração do projeto de um capacitor utilizando esta definição. Também serão apresentados alguns métodos para a medição de capacitância.

Finalmente, será apresentado o projeto dos capacitores a serem utilizados neste trabalho, juntamente com um estudo comparativo entre os valores teóricos e os obtidos experimentalmente através de diferentes métodos de medição.

#### **3.1 O circuito impresso flexível**

O circuito impresso flexível surgiu com a necessidade de evoluir o já conhecido circuito impresso, de forma a ser mais uma opção aos fabricantes de equipamentos eletrônicos.

A principal característica do circuito impresso flexível é, portanto, sua flexibilidade. Por ser produzido com materiais plásticos, o circuito pode ser dobrado ou realizar curvas sem apresentar quebra ou rachaduras. Tal característica também levou à redução de peso, pois a espessura do material é muito pequena, podendo ser comparada facilmente com a espessura de uma folha de papel comum. No material plástico, comumente chamado de material base ou dielétrico, são inseridas as trilhas condutoras de forma a conter o circuito desejado.

Atualmente, os circuitos impressos flexíveis são amplamente usados em computadores, telefones e equipamentos de telefonia, relés, giroscópios, mísseis, painéis de instrumentação automotivos e até em cobertores elétricos. As aplicações criadas com os circuitos impressos flexíveis são inúmeras, sendo limitadas apenas à imaginação dos engenheiros projetistas. A Figura 13 exemplifica um circuito impresso flexível.

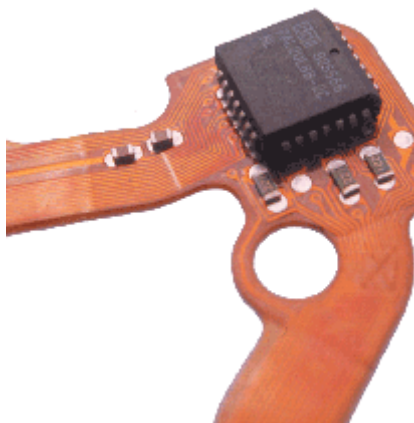


Figura 13 – Exemplo de um circuito impresso flexível

### **3.2 Classificação dos circuitos impressos flexíveis**

O termo “circuitos impressos flexíveis” engloba vários produtos. Em todos os casos, os circuitos consistem em variados condutores de cobre sobre um dielétrico (material base). O número de condutores de cobre empregado no projeto determina a classe do produto. As categorias genéricas desses circuitos são idênticas aos circuitos impressos rígidos:

- **Classe I:** circuito impresso flexível de face simples.
- **Classe II:** circuito impresso flexível de dupla face.
- **Classe III:** circuito impresso flexível de multicamadas.

As classes II e III não serão apresentadas neste trabalho, pois tais circuitos não são indicados para se construir um capacitor com condutores adjacentes. Isto será evidente quando se discutir a capacitância entre condutores adjacentes.

#### **3.2.1 Classe I: face simples**

O circuito impresso flexível de face simples contém apenas um plano condutivo e pode ou não apresentar uma película de revestimento sobre este plano. O material dielétrico usado para a fabricação dos circuitos impressos flexíveis de classe I variam muito com a aplicação desejada. Os mais utilizados são o vinil, Mylar, Teflon, Kapton,

entre outros. Quanto ao uso e a disponibilidade do revestimento, pode-se subdividir a classe I da seguinte maneira:

- **Classe Ia:** acesso simples sem revestimento (Coombs, 1979).

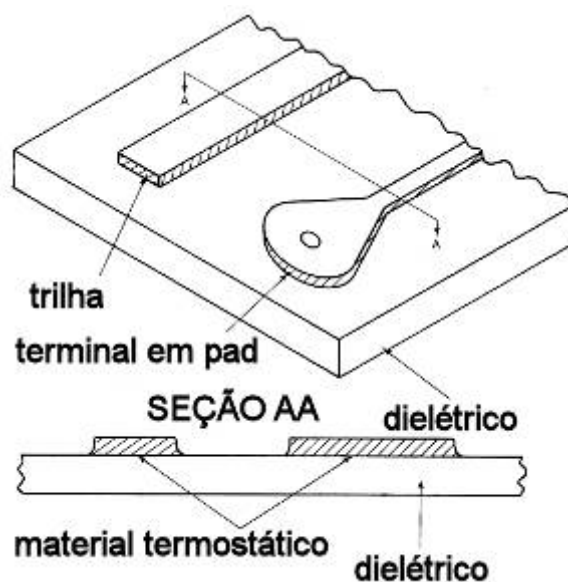


Figura 14 – Circuito impresso flexível classe Ia

- **Classe Ib:** acesso simples com revestimento (Coombs, 1979).

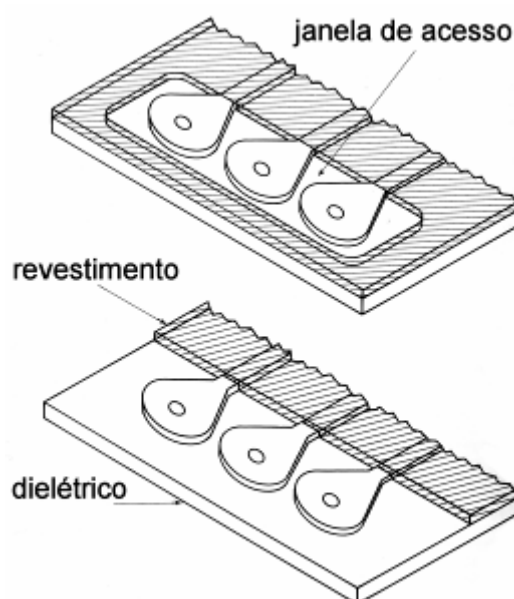


Figura 15 – Circuito impresso flexível classe Ib

- **Classe Ic:** acesso duplo sem revestimento (Coombs, 1979).

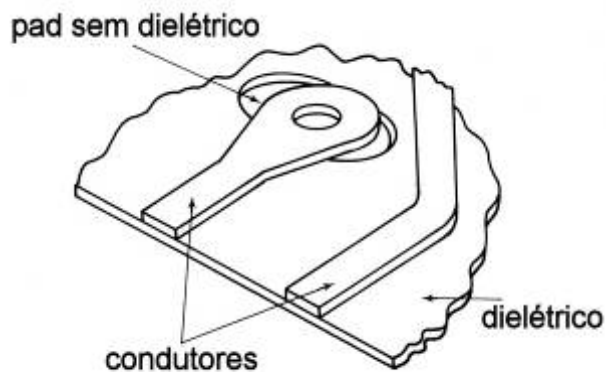


Figura 16 – Circuito impresso flexível classe Ic

- **Classe Id:** acesso duplo com revestimento (Coombs, 1979).

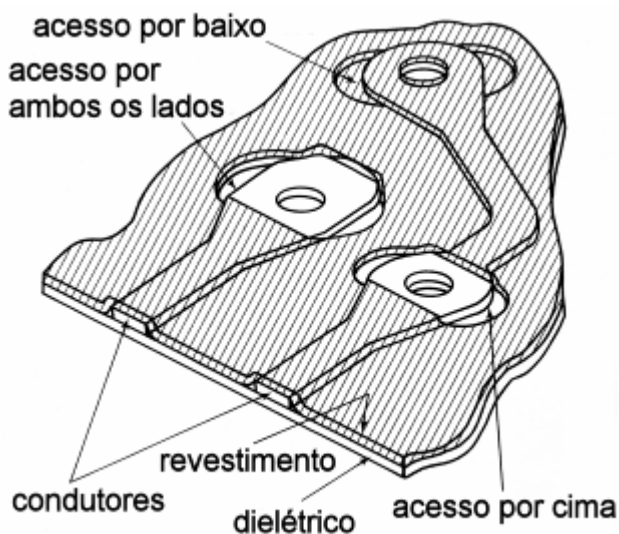


Figura 17 – Circuito impresso flexível classe Id

### 3.3 A capacitância entre condutores adjacentes

Neste estudo, a capacitância entre condutores adjacentes presente em um circuito impresso é de suma importância, pois a variação desta será o princípio de funcionamento do sensor capacitivo. Tal capacitância consiste em uma capacitância

paralela  $C_p$  e uma capacitância de dispersão  $C_f$ , como mostrado na Figura 18 (Coombs, 1979).

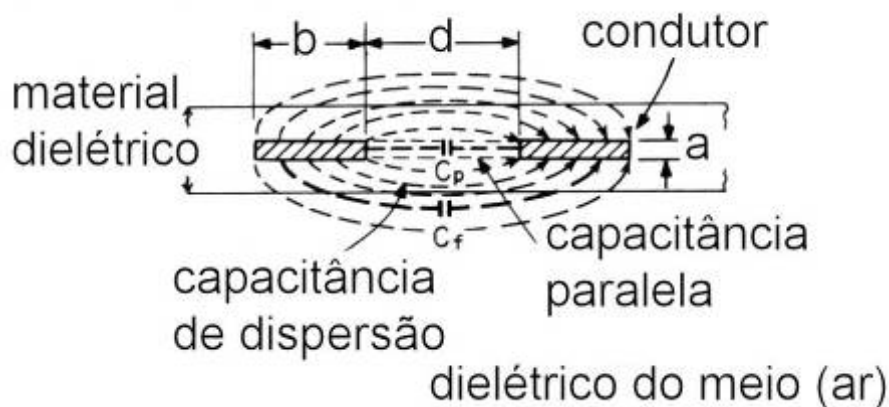


Figura 18 – Capacitância distribuída entre condutores adjacentes

A capacitância paralela  $C_p$  é geralmente insignificante, uma vez que os condutores são muito finos, apresentando uma área muito pequena em oposição ao outro condutor. A capacitância de dispersão  $C_f$  é então a principal forma de capacitância distribuída entre condutores adjacentes em um circuito impresso. Uma vez que uma porção dispersa do campo prolonga-se pelo ar fora da fina camada de isolamento, o cálculo exato da capacitância depende dos seguintes fatores:

- Espessura da camada de isolamento;
- Constante dielétrica da camada de isolamento;
- Constante dielétrica do meio;
- Largura dos condutores;
- Espessura dos condutores;
- Espaçamento entre condutores;
- Proximidade com malha de terra;
- Frequência (já que a constante do dielétrico varia com a frequência).

Para obter valores de capacitância com maior precisão, é necessário efetuar medidas em laboratório. Porém a capacitância distribuída pode ser aproximadamente determinada ao estabelecer uma constante dielétrica de “valor médio”, cujo valor estará entre o valor do dielétrico do material base e o do ar. Os valores de capacitância

calculados usando essa aproximação servem como guia para a capacitância distribuída que irá realmente existir em uma dada configuração de circuito.

A capacitância entre condutores adjacentes pode ser calculada com boa precisão pela equação (3.1) (Coombs, 1979).

$$C = 0,31 \times \frac{a}{b} + 0,23 \times (1 + k) \times \log_{10} \left( 1 + \frac{2b}{d} + 2b + \frac{b^2}{d^2} \right) \quad (3.1)$$

Onde:

- C: capacitância entre condutores adjacentes, em picofarads por polegada.
- a: espessura do condutor, em polegadas.
- b: largura do condutor, em polegadas.
- k: constante dielétrica do material, adimensional.
- d: distância entre condutores, em polegadas.

É interessante ajustar a equação (3.1) para que os valores de entrada estejam no SI, ou seja, que a distância seja expressa em milímetros e a capacitância seja expressa em (pF/mm), pois são unidades mais usuais em projetos de circuitos impressos. Assim, a equação modificada será:

$$C = 0,01220 \times \frac{a}{b} + 0,00906 \times (1 + k) \times \log_{10} \left( 1 + \frac{2b}{d} + \frac{b}{12,7} + \frac{b^2}{d^2} \right) \quad (3.2)$$

Onde:

- C: capacitância entre condutores adjacentes, em picofarads por milímetro.
- a: espessura do condutor, em milímetros.
- b: largura do condutor, em milímetros.
- k: constante dielétrica do material, adimensional.
- d: distância entre condutores, em milímetros.



Ambas as equações (3.1) e (3.2) assumem que existe somente um par de condutores livres da influência de outros condutores na redondeza ou malhas de terra. Caso exista interesse em reduzir a capacitância entre condutores adjacentes é necessário utilizar as configurações apresentadas na Figura 19 (Coombs, 1979).

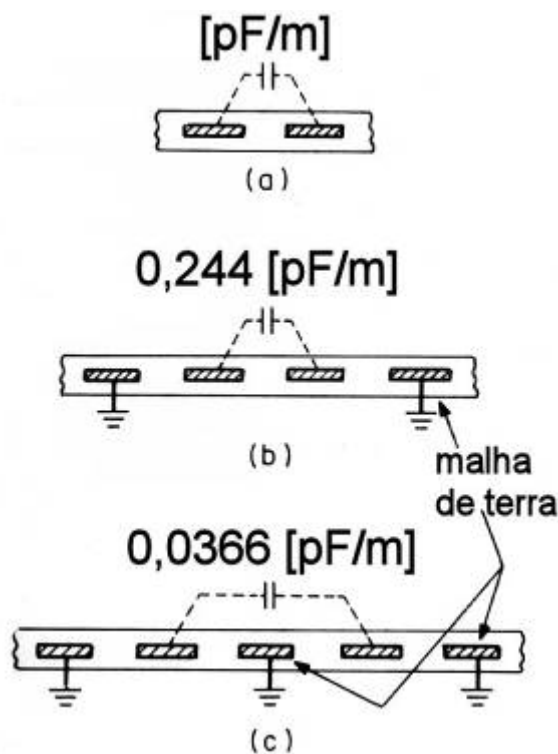


Figura 19 – Efeito típico de blindagem para condutores adjacentes: (a) sem blindagem, (b) blindagem periférica e (c) blindagem periférica e entre condutores

Na Figura 19, o valor da capacitância em *b* é reduzido em aproximadamente 75,6% em comparação com a configuração *a*. A redução ocorre porque algumas linhas do fluxo de dispersão, que normalmente se uniam aos condutores, agora se unem à malha de terra que está próxima a eles, diminuindo o valor da capacitância medida. Novamente, a capacitância entre dois condutores foi mais drasticamente reduzida (aproximadamente 96,34%) quando foi usada a configuração *c*.

### 3.3.1 Exemplo de um projeto utilizando a capacitância entre condutores adjacentes

Existem vários dielétricos que podem ser utilizados na produção de um capacitor com condutores adjacentes. Em (ASI Instruments, 2005), existe uma grande lista com

valores de constante dielétrica para vários materiais. O projetista deve estar ciente de que a constante dielétrica de um material varia com a frequência. Ressalta-se ainda que o dielétrico escolhido deva ser compatível com o disponível na indústria. Por exemplo, para circuitos impressos rígidos, o fenolite e a fibra de vidro são os materiais mais comuns no Brasil. Já para os circuitos impressos flexíveis, o poliéster e o vinil são os mais comuns.

Neste exemplo, será projetado um capacitor em um circuito impresso, utilizando duas trilhas de cobre paralelas e adjacentes entre si. O circuito impresso empregado pode ser tanto rígido como flexível, pois a geometria é a mesma em ambos os casos. Porém, ressalta-se o uso correto da constante dielétrica do material para cada caso, levando em conta a frequência do sinal que estará submetido o capacitor durante sua medição.

Em (Cirvale circuitos impressos, 2005), tem-se alguns dados interessantes sobre a fabricação de circuitos impressos rígidos, apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – Valores típicos para a produção de circuitos impressos rígidos

<i>Material dielétrico</i>	<i>Nº. de faces</i>	<i>Espessura do cobre (<math>\mu\text{m}</math>)</i>	<i>Espessura do dielétrico (mm)</i>	<i>Constante dielétrica</i>
Fibra de vidro	1	35	0,8 / 1 / 1,6	$\leq 5,4$
	2	17,5		
Composite	1	35	1,6	$\leq 5,2$
Fenolite FR2	1	35	1 / 1,6	$\leq 5,5$

Os circuitos impressos flexíveis e rígidos apresentam características semelhantes de produção, como por exemplo, a espessura do condutor. A Tabela 3 (Condugraf, 2005) apresenta algumas diferenças entre os dois tipos de circuitos.

Tabela 3 – Valores comparativos entre circuitos impressos rígidos e flexíveis

<i>Tipo de circuito impresso</i>	<i>Rígido</i>	<i>Flexível</i>
<i>Menor largura do condutor (mm)</i>	0,2	0,4
<i>Menor espaçamento entre condutores (mm)</i>	0,3	0,3

Ao utilizar a equação (3.2) para calcular o valor da capacitância, tem-se que é necessário então variar os parâmetros  $a$ ,  $b$ ,  $k$  e  $d$  a fim de se projetar o capacitor desejado.

Pode-se iniciar o projeto definindo o dielétrico a ser utilizado. Neste exemplo, utiliza-se o *fenolite FR2*, um material muito comum na confecção de circuitos impressos rígidos. Em (PCB-Shop, 2005), tem-se que valor do dielétrico para um sinal de 1 (MHz) é:

$$k = 4,1$$

Outro parâmetro importante é a espessura do condutor,  $a$ , que usualmente já possui valores padrão de acordo com o fabricante. Portanto, deve-se adotar um valor típico. Neste caso:

$$a = 0,035 \quad (\text{mm})$$

Os dois últimos parâmetros,  $b$  e  $d$ , devem ser variados a fim de se obter um gráfico com os valores de capacitância possíveis de serem obtidos de acordo com os parâmetros pré-determinados. A Figura 20 apresenta os possíveis valores do capacitor.

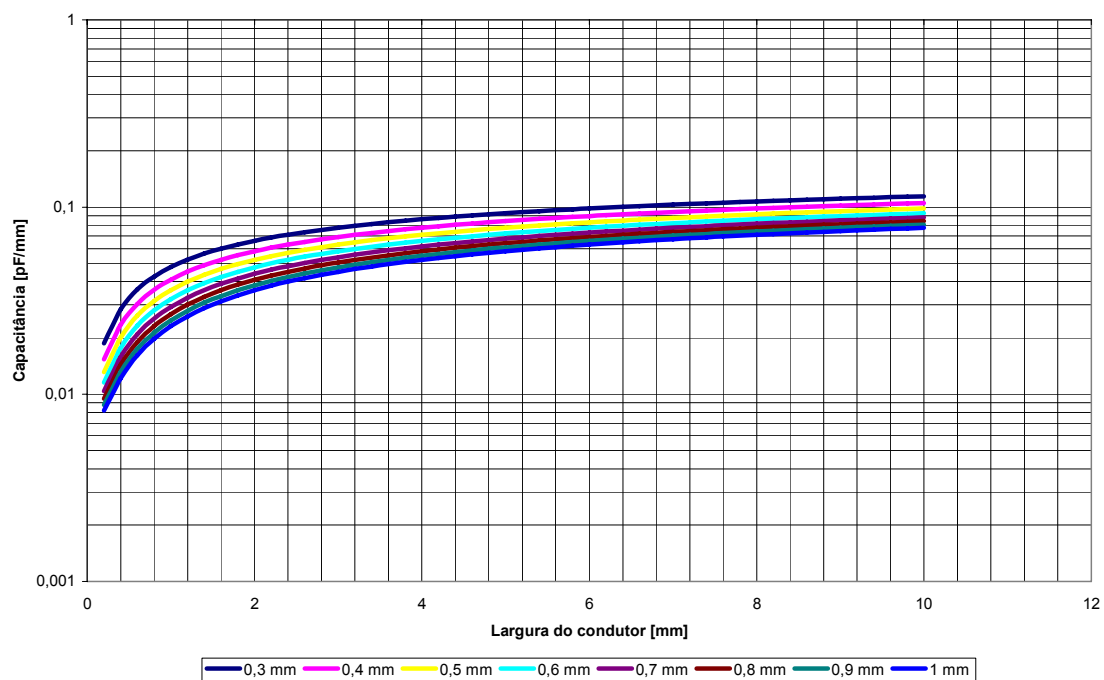


Figura 20 – Valores de capacitância para diferentes espaçamentos entre condutores no Fenolite FR2 com condutores de 0,035 (mm) de espessura

Na Figura 20, nota-se que o valor da capacitância aumenta com o aumento da largura dos condutores e com a diminuição do espaçamento entre os mesmos. A Figura 21 apresenta a variação da capacitância em função da largura do condutor, para uma espessura de 0,5 (mm) (fora dos padrões de produção).

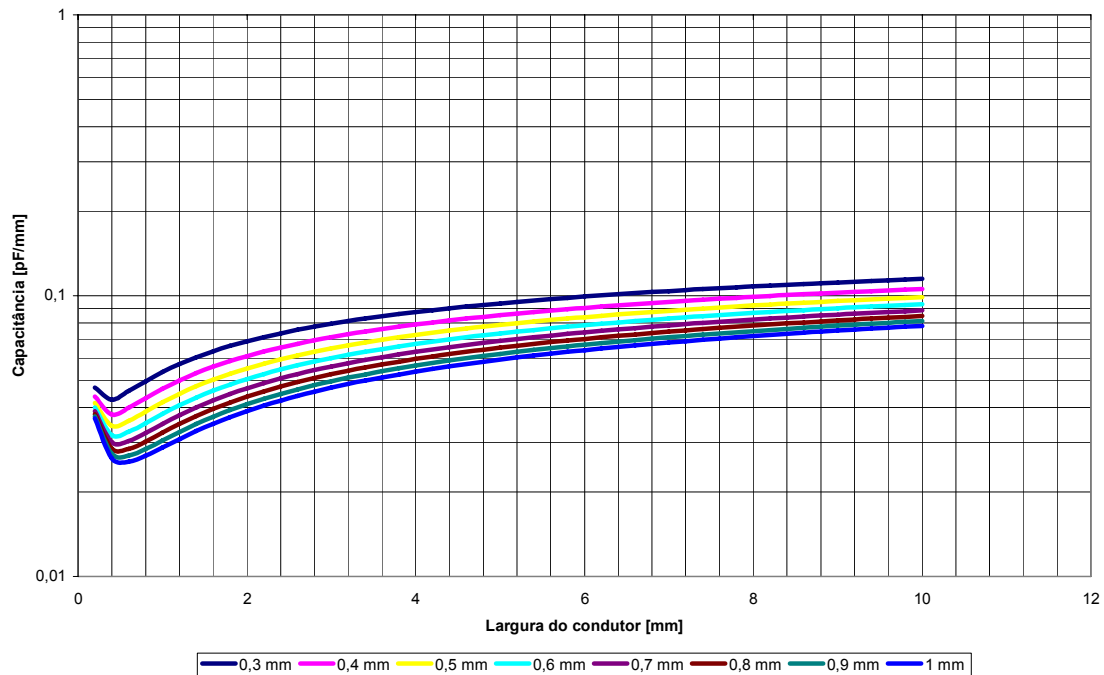


Figura 21 – Valores de capacitância para diferentes espaçamentos entre condutores no Fenolite FR2 com condutores de 0,5 (mm) de espessura

Na Figura 21, nota-se um aumento da capacitância com o aumento da espessura do condutor. Portanto, para o projetista obter altos valores de capacitância, deve-se:

- Utilizar o menor espaçamento possível de projeto entre os condutores.
- Utilizar a maior largura possível para os condutores.
- Utilizar a maior espessura possível para os condutores.
- Utilizar um material dielétrico que possua o maior valor da constante dielétrica.

Uma vez definido os parâmetros  $b$  e  $d$  de acordo com o desejado, é necessário projetar o *layout* do capacitor. Para tal podem-se utilizar vários softwares *CAD* para circuitos impressos.

### 3.4 Medidas de capacitância

Após o projeto e produção do capacitor, é recomendado realizar medidas a fim de verificar se o valor da capacitância está igual ou próximo ao desejado em projeto.

Existem vários métodos para medição da capacitância, cada qual com vantagens e desvantagens. Em (IPC, 2005) recomenda-se os métodos de medição em ponte. As pontes para medição da capacitância mais conhecidas são Sauty, Wien, Schering e Nerst (Bortoni, 2002). Essas pontes são alimentadas com corrente alternada devido à reatância capacitiva presente no capacitor, que varia de acordo com a frequência empregada. A reatância capacitiva, por sua vez, apresenta uma característica linear, que viabiliza a detecção da reatância através das pontes.

A configuração básica de uma ponte de corrente alternada é mostrada na Figura 22 (Bortoni, 2002).

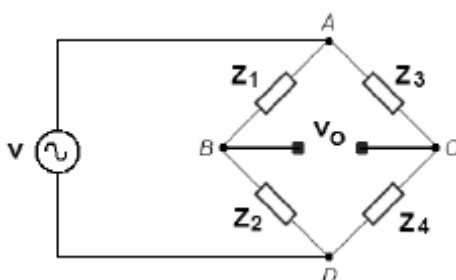


Figura 22 – Configuração básica de uma ponte de corrente alternada

Nesta ponte, a tensão  $v_0$  é a tensão de saída, em função da fonte  $v$  e das impedâncias complexas  $Z_1$ ,  $Z_2$ ,  $Z_3$  e  $Z_4$ . Assim, utilizando o divisor de tensão para determinar  $v_0$ , tem-se:

$$v_0 = V_B - V_C = \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2} v - \frac{Z_4}{Z_3 + Z_4} v \quad (3.3)$$

Onde:

- $Z_1, Z_2, Z_3$  e  $Z_4$ : impedância, em ohms.
- $v$ : tensão da fonte de alimentação, em volts.
- $v_0$ : tensão de saída, em volts.

O equilíbrio da ponte se dará quando:

$$v_0 = 0$$

(3.4)

Substituindo, temos:

$$0 = \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2} v - \frac{Z_4}{Z_3 + Z_4} v$$

$$\frac{Z_2}{Z_1 + Z_2} v = \frac{Z_4}{Z_3 + Z_4} v$$

$$\frac{Z_2}{Z_1 + Z_2} = \frac{Z_4}{Z_3 + Z_4}$$

$$Z_2(Z_3 + Z_4) = Z_4(Z_1 + Z_2)$$

$$Z_2 \cdot Z_3 + Z_2 \cdot Z_4 = Z_4 \cdot Z_1 + Z_4 \cdot Z_2$$

$$Z_2 \cdot Z_3 = Z_1 \cdot Z_4$$

(3.5)

Como as impedâncias são complexas, tem-se que a condição de igualdade deve ser verificada na parte real e imaginária. Portanto:

$$|Z_2| \cdot |Z_3| = |Z_1| \cdot |Z_4|$$

(3.6)

Conseqüentemente:

$$\phi_2 + \phi_3 = \phi_1 + \phi_4$$

(3.7)

### 3.4.1 Ponte Sauty

A ponte Sauty é indicada para a medição de capacitâncias com alto fator de qualidade, ou seja, para a medição de impedâncias capacitivas com um grande ângulo. A Figura 23 apresenta a configuração da ponte (Bortoni, 2002).

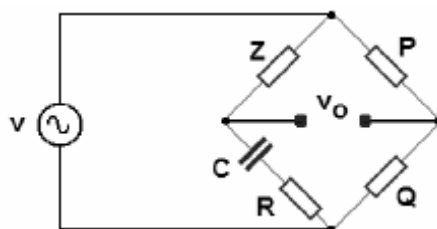


Figura 23 – Configuração de uma ponte Sauty

Onde:

- Z: impedância desconhecida, em ohms.
- P e Q: impedâncias conhecidas, em ohms.
- R: resistência conhecida, em ohms.
- C: capacitância conhecida, em farads.
- v: tensão da fonte de alimentação, em volts.
- $v_0$ : tensão de saída, em volts.

Nesta ponte, a impedância desconhecida a ser determinada é dada por:

$$Z = \frac{P}{Q} \left[ R - j \frac{1}{\omega C} \right] \quad (3.8)$$

### 3.4.2 Ponte Wien

A ponte Wien é indicada para a medição de capacitâncias com baixo fator de qualidade, ou seja, para a medição de impedâncias capacitivas com ângulo pequeno. A Figura 24 apresenta a configuração da ponte (Bortoni, 2002).



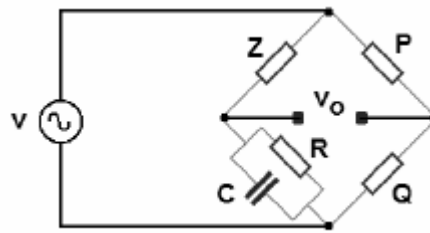


Figura 24 – Configuração de uma ponte Wien

Onde:

- Z: impedância desconhecida, em ohms.
- P e Q: impedâncias conhecidas, em ohms.
- R: resistência conhecida, em ohms.
- C: capacitância conhecida, em farads.
- v: tensão da fonte de alimentação, em volts.
- $v_0$ : tensão de saída, em volts.

Nesta ponte, a impedância desconhecida a ser determinada é dada por:

$$Z = \frac{P}{Q} \left[ \frac{1}{\frac{1}{R} + j\omega C} \right]$$

(3.9)

### 3.4.3 Medição por rampa de subida

Neste método, o valor do capacitor é medido conforme o tempo de carregamento do mesmo (Hyperphysics, 2005). O circuito de carregamento do capacitor é representado pela Figura 25.

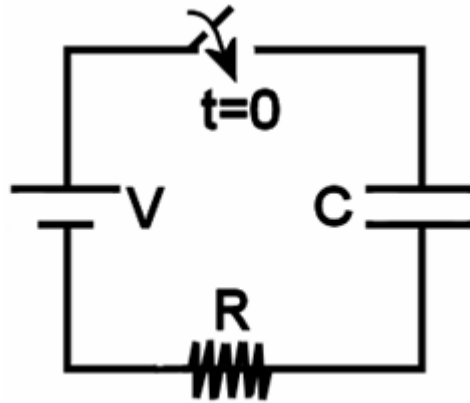


Figura 25 – Circuito de carregamento do capacitor

Onde:

- R: resistência, em ohms.
- C: capacitância, em farads.
- V: tensão da fonte de alimentação, em volts.

Quando  $t=0$ , a chave está aberta e não há tensão no capacitor. Imediatamente ao se fechar a chave, a tensão em volts no capacitor,  $V_C$ , será dada por:

$$V_C = V \times \left( 1 - e^{-\frac{t}{RC}} \right)$$

(3.10)

A forma de onda da tensão  $V_C$  é representada pela Figura 26.

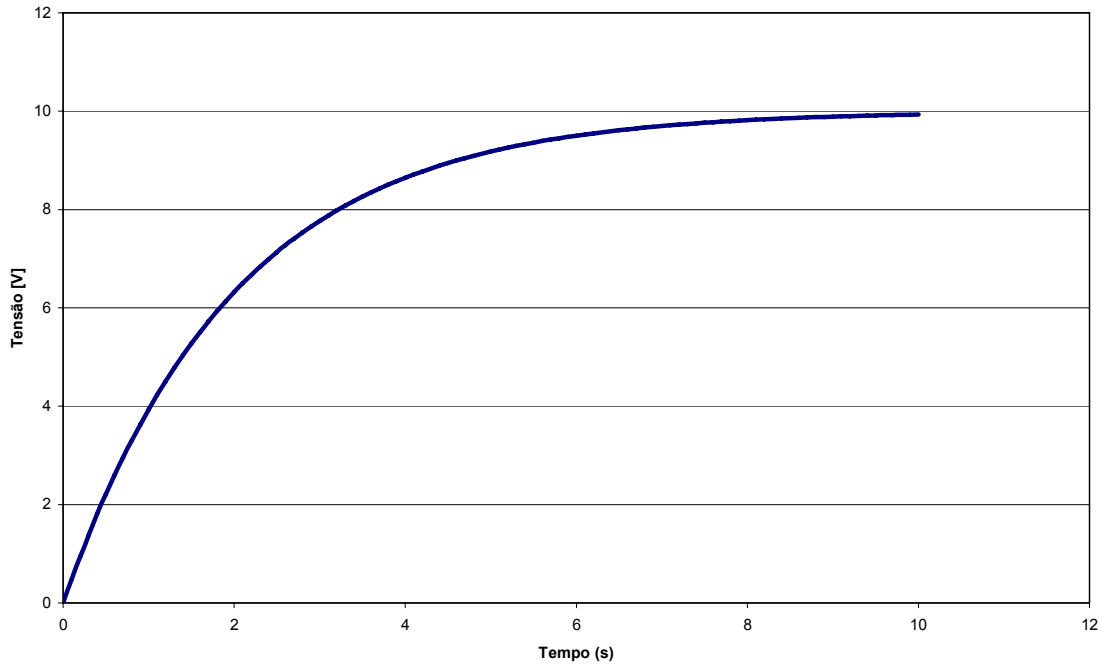


Figura 26 – Forma de onda da tensão sobre o capacitor durante seu carregamento

Ao fazer  $t=RC$ , tem-se:

$$V_C = V \times \left( 1 - e^{-\frac{RC}{RC}} \right)$$

$$V_C = V \times (1 - e^{-1})$$

$$V_C = V \times 0,632$$

(3.11)

A equação (3.11) diz que quando a tensão sobre o capacitor for 0,632 da tensão da fonte, tem-se que  $t=RC$ . Verifica-se então no osciloscópio qual é o tempo para que a tensão seja 0,632 da tensão da fonte. Assim, encontrado o tempo  $t$  e conhecido o resistor  $R$ , pode-se determinar  $C$ .

É importante ressaltar que deve ser verificado se o capacitor está carregando e descarregando completamente antes de iniciar a medição.

### 3.4.4 Medição por diferenças

Existem outros métodos de medição. Um método muito interessante que será empregado na medição dos capacitores projetados neste trabalho utiliza o princípio da diferença entre sinais (Fischer, 2002).

Os métodos de medição em ponte, conforme mostrados anteriormente, são baseados no equilíbrio de uma ponte, que se dá quando a equação (3.6) é verdadeira. Assim, ao ocorrer o equilíbrio, pode-se determinar o valor da impedância correspondente ao capacitor de valor desconhecido. Já o método por diferenças não necessita de três elementos para operar, como os existentes em uma ponte. Neste método, é necessário apenas um capacitor de valor conhecido como referência para se determinar o valor do capacitor desconhecido.

O princípio de funcionamento deste método é baseado na diferença de tensão entre os capacitores envolvidos. Um sinal, proveniente de um oscilador, é integrado pelos capacitores. Os sinais integrados apresentam então forma de onda triangular e amplitudes proporcionais a cada capacitor. A diferença entre os sinais será proporcional ao capacitor de valor desconhecido.

O circuito integrado CAV424 da Analog Microelectronics (Fischer, 2002) possui este princípio de funcionamento, contendo ainda condicionamento de sinal e opções de ajuste para a operação, tornando atrativo o uso deste método com apenas um *chip* e poucos componentes externos. A Figura 27 representa o circuito interno do CAV424 e seus componentes externos necessários para operação (Fischer, 2002).



As amplitudes dos sinais integrados são proporcionais aos capacitores CX1 e CX2. Com alta razão de rejeição comum e alta resolução, é realizada a diferença das duas amplitudes, igual à CX1–CX2. O sinal é retificado em um filtro passa baixa, sendo depois transferido para um circuito diferencial de saída com ganho ajustável.

Algumas variáveis do circuito podem ser ajustadas com poucos componentes externos, como por exemplo, constantes de filtro e amplificação. A tensão de saída do circuito, LPOUT-VM, é então proporcional à capacitância CX2.

A grande vantagem em utilizar os integradores com as capacitâncias CX1 e CX2 está no fato que a capacitância CX2 pode variar de 5% a 100% em relação à capacitância de referência CX1 e ainda ser medida perfeitamente. Nas informações disponíveis sobre o circuito integrado CAV424, tem-se que a capacitância de referência CX1 pode variar de 10 (pF) até 1 (nF). Portanto, a capacitância desconhecida pode variar de 0,5 (pF) até 2 (nF).

### **3.5 Projeto e análise dos capacitores planos**

Os capacitores planos a serem utilizados no sistema de monitoramento on-line necessitam ser projetados e devidamente analisados quanto à sua capacitância.

#### **3.5.1 Projeto**

Projetou-se baseado na equação (3.2) 21 capacitores com comprimento, largura e separação entre as trilhas condutivas variados. Para tal, definiu-se o *layout* a ser empregado: trilhas condutoras paralelas e adjacentes. A Figura 29 representa o *layout*.



Figura 29 – *Layout* empregado nos capacitores planos

Projetaram-se outros dois capacitores com *layouts* diferentes, a fim de obter um valor maior de capacitância e analisar a interferência de diferentes geometrias no valor da mesma. A Figura 30 representa tais *layouts*.



Figura 30 – Dois *layouts* diferentes

Definidos os *layouts*, consultou-se vários fornecedores a fim de levantar os materiais disponíveis para a fabricação, bem como as restrições nas medidas de espessura e espaçamento das trilhas condutoras. A Tabela 4 e a Tabela 5 apresentam os dados.

Tabela 4 – Materiais disponíveis para a produção dos capacitores planos

<i>Material</i>	<i>Tipo</i>
<i>Dielétrico</i>	Poliéster
<i>Condutor</i>	Tinta condutiva de prata
<i>Película de revestimento</i>	Poliéster

Tabela 5 – Medidas mínimas possíveis para a produção dos capacitores planos

<i>Medidas</i>	<i>Valor</i>
<i>Espessura mínima do condutor (mm)</i>	0,035
<i>Espaçamento mínimo entre condutores (mm)</i>	0,7

Infelizmente, o espaçamento mínimo entre os condutores que pode ser garantido na produção é de 0,7 (mm) para os circuitos impressos flexíveis. Em circuitos impressos

rígidos, este espaçamento pode ser de 0,3 (mm), que contribui para um valor maior de capacitância. Foi recomendado pelos fabricantes que a espessura do condutor não fosse aumentada, pois isso afetaria o espaçamento entre os mesmos. Portanto utilizou-se a espessura mínima recomendada. Com base nos *layouts* e nas informações da Tabela 4 e Tabela 5, os 23 capacitores foram projetados conforme as medidas da Tabela 6.

Tabela 6 – Medidas dos capacitores produzidos com espessura mínima de 0,035 (mm)

<i>Largura (mm)</i>	<i>Comprimento (mm)</i>	<i>Espaçamento (mm)</i>
10	100	0,7
	150	
	200	
	250	
	300	
	100	0,8
	100	0,9
20	100	0,7
	150	
	200	
	250	
	300	
	100	0,8
	100	0,9
30	100	0,7
	150	
	200	
	250	
	300	
	100	0,8
	100	0,9
10 – capacitor em U	100	0,7
10 – capacitor em E	150	



O revestimento de proteção dos capacitores foi inserido a fim de proteger as trilhas condutoras. Porém, para se ter o acesso aos terminais do mesmo, foi projetado o acesso aos terminais através de uma área sem revestimento com 10 (mm) de comprimento. O Anexo I apresenta os *layouts* finais para a produção dos capacitores.

### 3.5.2 Análise

Uma vez que os capacitores planos projetados foram produzidos, é necessário analisá-los quanto a seus valores. Calculou-se utilizando a equação (3.2), com  $k=3,1$  para o poliéster, os valores dos capacitores projetados, apresentados na Tabela 7.

A fim de analisar os valores calculados, utilizou-se a medição por rampa de subida para a medição dos capacitores, com os seguintes instrumentos:

- Osciloscópio digital Tektronix TDS340, com ponta de prova de 11,5 (pF).
- Gerador de funções DAWER modelo FG-200D.

Ajustou-se o gerador de funções para uma onda quadrada positiva com período de 1 (kHz). O resistor, necessário ao circuito, foi de 1 (M $\Omega$ ) com tolerância de 1%. A Figura 31 representa o circuito.

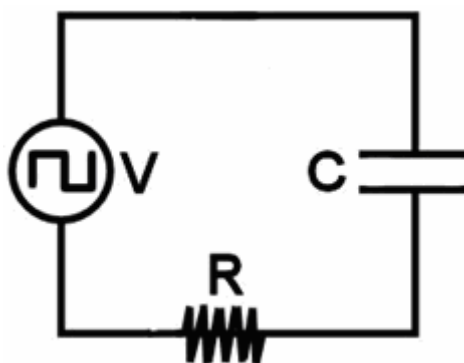


Figura 31 – Circuito para medição da capacitância por rampa de subida

Todas as medições foram feitas com os capacitores suspensos no ar. A Figura 32 apresenta a bancada de medições.

Tabela 7 – Valores calculados dos capacitores projetados

<i>Largura (mm)</i>	<i>Comprimento (mm)</i>	<i>Espaçamento (mm)</i>	<i>Valor calculado (pF)</i>
10	100	0,7	8,8
	150		13,2
	200		17,6
	250		22,0
	300		26,4
	100	0,8	8,4
	100	0,9	8,1
20	100	0,7	10,9
	150		16,4
	200		21,9
	250		27,3
	300		32,8
	100	0,8	10,5
	100	0,9	10,2
30	100	0,7	12,2
	150		18,3
	200		24,4
	250		30,5
	300		36,6
	100	0,8	11,8
	100	0,9	11,4
10 – U	490	0,7	43,2
10 – E	970		85,4



Figura 32 – Bancada de medições com capacitor suspenso no ar (em detalhe)

Com o osciloscópio empregado, obteve-se uma imagem em sua tela para cada medição realizada. A primeira medição realizada com o osciloscópio é representada pela Figura 33. Todas as aquisições pelo osciloscópio estão apresentadas no Anexo II.

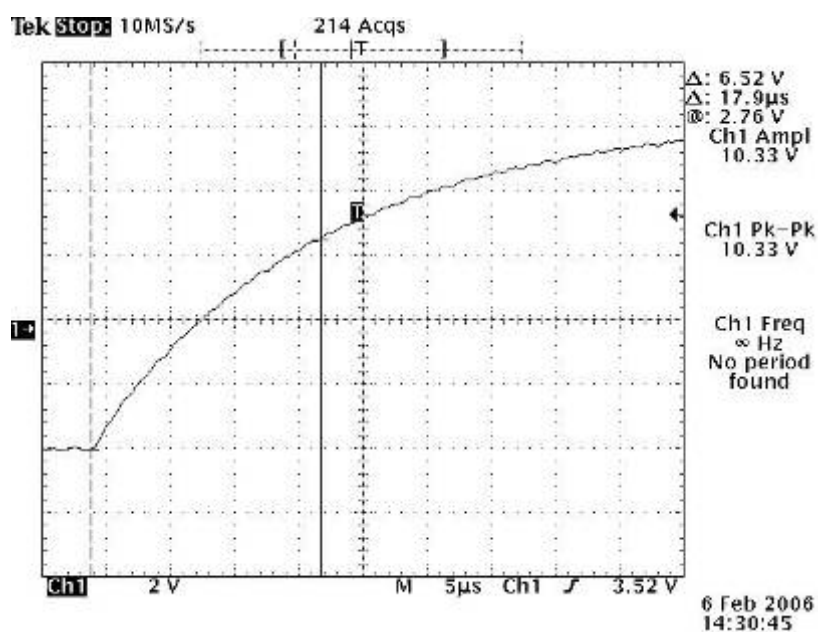


Figura 33 – Rampa de subida para o capacitor de 10 (mm) de largura por 100 (mm) de comprimento e espaçamento de 0,7 (mm)

Na Figura 33, a linha cheia vertical que cruza a rampa é o ponto onde a tensão sob o capacitor é 0,632 da tensão do gerador de funções. A outra linha vertical, esta tracejada, indica o início da rampa de subida. A diferença entre as duas linhas verticais é o tempo  $t$ , representado na Figura 33 por um delta ( $\Delta$ ) cuja unidade é dada em microssegundos ( $\mu\text{s}$ ). Como o resistor empregado é de 1 ( $\text{M}\Omega$ ) e a base de tempo está em microssegundos, o valor em farads da capacitância em cada gráfico será:

$$C = \frac{t}{R} = \frac{t \times 10^{-6}}{1 \times 10^6} = t \times 10^{-12}$$

A Tabela 8 apresenta os valores calculados e as medidas obtidas, descontadas do valor da ponta de prova do osciloscópio.

Ao comparar os valores calculados com os obtidos pela medição utilizando a rampa de subida, nota-se que houve diferença. Isso se deve ao valor do dielétrico cujos condutores estão inseridos, uma vez que não estão totalmente imersos no poliéster.

É recomendado (Coombs, 1979) que se faça uma média dos valores dos dielétricos cujos condutores estão inseridos. Como os capacitores foram medidos estando suspensos no ar, utiliza-se o valor do dielétrico como sendo a média entre o valor dos dielétricos. A Tabela 9 apresenta novos valores calculados utilizando o valor médio para o dielétrico.

Tabela 8 – Valores dos capacitores medidos por rampa de subida

<i>Largura (mm)</i>	<i>Comprimento (mm)</i>	<i>Espaçamento (mm)</i>	<i>Valor calculado (pF)</i>	<i>Valor medido (pF)</i>	<i>Erro (%)</i>
10	100	0,7	8,8	6,4	-27,3
	150		13,2	6,1	-53,8
	200		17,6	7,7	-56,3
	250		22,0	9,3	-57,7
	300		26,4	10,9	-58,7
	100	0,8	8,4	7,1	-15,5
	100	0,9	8,1	6,6	-18,5
20	100	0,7	10,9	3,8	-65,1
	150		16,4	5,4	-67,1
	200		21,9	7,4	-66,2
	250		27,3	9,9	-63,7
	300		32,8	11,8	-64,0
	100	0,8	10,5	4	-61,9
	100	0,9	10,2	3,9	-61,8
30	100	0,7	12,2	4,9	-59,8
	150		18,3	7,5	-59,0
	200		24,4	9,5	-61,1
	250		30,5	11,5	-62,3
	300		36,6	14,5	-60,4
	100	0,8	11,8	4,3	-63,6
	100	0,9	11,4	4	-64,9
10 – U	490	0,7	43,2	17,5	-59,5
10 – E	970		85,4	31,5	-63,1

Tabela 9 – Valores calculados utilizando uma constante dielétrica média

<i>Largura (mm)</i>	<i>Comprimento (mm)</i>	<i>Espaçamento (mm)</i>	<i>Valor calculado (pF)</i>	<i>Valor medido (pF)</i>	<i>Erro (%)</i>
10	100	0,7	6,6	6,4	-3,0
	150		9,8	6,1	-37,8
	200		13,1	7,7	-41,2
	250		16,4	9,3	-43,3
	300		19,7	10,9	-44,7
	100	0,8	6,3	7,1	12,7
	100	0,9	6,0	6,6	10,0
20	100	0,7	8,1	3,8	-53,1
	150		12,2	5,4	-55,7
	200		16,3	7,4	-54,6
	250		20,3	9,9	-51,2
	300		24,4	11,8	-51,6
	100	0,8	7,8	4	-48,7
	100	0,9	7,6	3,9	-48,7
30	100	0,7	9,1	4,9	-46,2
	150		13,6	7,5	-44,9
	200		18,2	9,5	-47,8
	250		22,7	11,5	-49,3
	300		27,2	14,5	-46,7
	100	0,8	8,8	4,3	-51,1
	100	0,9	8,5	4	-52,9
10 – U	490	0,7	32,1	17,5	-45,5
10 – E	970		63,6	31,5	-50,5

Na Tabela 9, mesmo após efetuar a média do dielétrico e calcular novamente as capacitâncias, as medidas dos capacitores foram diferentes. Deve-se então determinar a proporção entre os dielétricos ao invés de simplesmente utilizar um valor médio.

Outra informação importante na mesma tabela diz respeito aos capacitores com geometrias em U e E. Seus valores calculados são diferentes e muito maiores que os medidos. Isso se deve porque o efeito apresentado na Figura 19 está presente nestes capacitores.

## **4 Modelagens matemáticas**

O monitoramento on-line do entreferro de uma máquina síncrona necessita não só de um sistema completo de aquisição de dados, mas também de ferramentas matemáticas para o tratamento e análise dos dados a serem aquisitados.

Neste trabalho, deseja-se monitorar a circunferência do rotor e a do estator quanto à sua deformidade. Para atingir estes objetivos, necessita-se de uma modelagem matemática capaz de determinar graficamente o rotor e o estator de acordo com os dados colhidos pelo sistema de aquisição. Aqui, tais modelagens utilizam dados hipotéticos, que não refletem a realidade. Por isso, as deformações são notadas mais facilmente devido à ordem de grandeza entre os diâmetros do rotor e estator e o espaço do entreferro.

### **4.1 Modelagem matemática do rotor**

A modelagem matemática necessária para determinar graficamente a circunferência do rotor de uma máquina síncrona de pólos salientes deve ser aplicável a todas as máquinas síncronas sem exceções. Para tal, a modelagem deve ser fortemente dependente do sistema de aquisição de dados, e não da máquina.

O primeiro passo para a modelagem é a consideração sobre o sistema de aquisição de dados. Tal sistema deve possuir um sensor fixado no entreferro da máquina síncrona, capaz de detectar a distância entre ele e os pólos da máquina síncrona durante o funcionamento da mesma. A Figura 34 representa o sistema.



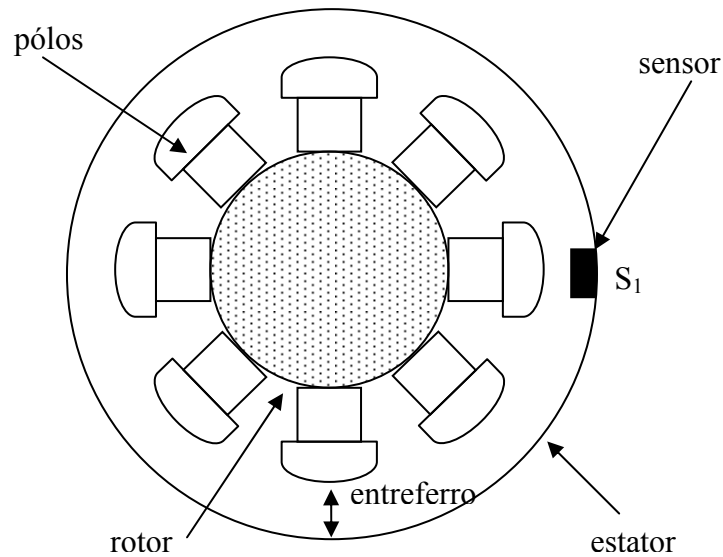


Figura 34 – Instalação do sensor de entreferro

O sistema de aquisição de dados também deve possuir um sensor capaz de determinar se o rotor realiza uma volta completa ao girar. Tal sensor, que pode ser chamado de sensor de rotação, deve informar a ocorrência de uma volta do rotor ao detectar a presença de uma marcação inserida no eixo do mesmo. A resposta do sensor convém ser dada em forma de pulsos. A Figura 35 representa o sensor de rotação.

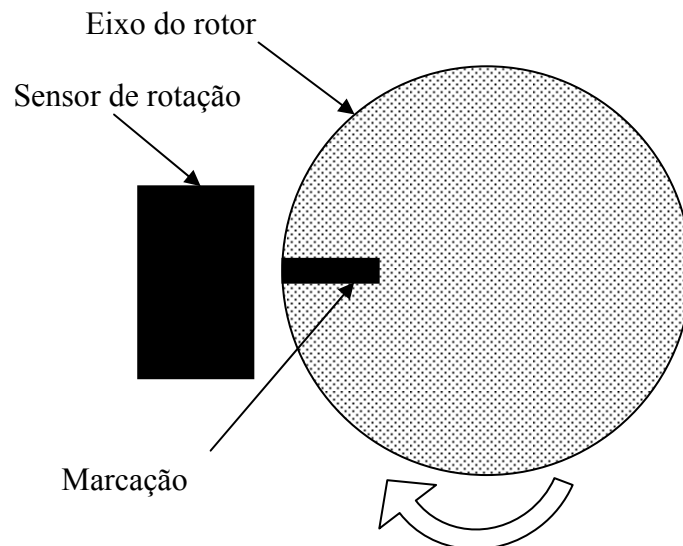


Figura 35 – Instalação do sensor de rotação

A última consideração importante é o formato da resposta do sistema de aquisição de dados. A fim de facilitar a modelagem, a resposta do sistema deve ser a

distância entre o pólo e o sensor, dada em milímetros. Neste formato, os dados provenientes dos sensores podem ser facilmente trabalhados.

Considere agora, por hipótese, que o sistema de aquisição de dados levantou uma série de medidas para uma máquina síncrona de oito pólos, durante uma volta, referente a cada pólo. Tais medidas são representadas na Tabela 10.

Tabela 10 – Medidas hipotéticas de uma máquina síncrona de oito pólos salientes

<i>Medida</i>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>7</i>	<i>8</i>	<i>9</i>
<i>Valor (mm)</i>	1,3	2,2	2,6	1,9	2,2	2,5	2,7	2,6	1,3

Na Tabela 10, a nona medida é simplesmente a repetição da primeira, enfatizando a ocorrência de uma volta completa do rotor.

De posse dessas medidas, é necessário introduzi-las em um sistema de coordenadas a fim de determinar graficamente o rotor. O sistema de coordenadas cartesianas é o mais simples e de fácil entendimento, e será o sistema adotado. Para inserir tais medidas no sistema de coordenadas, é necessário compará-las com circunferências de referência. A Figura 36 representa as circunferências de referência do rotor e do estator.

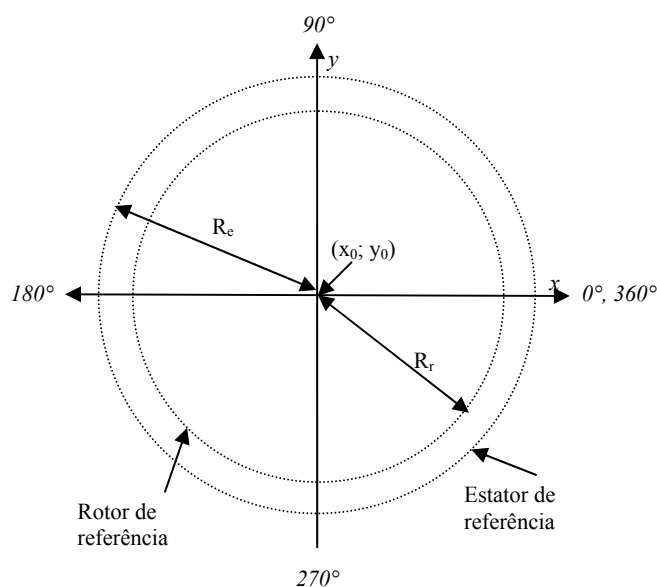


Figura 36 – Circunferências de referência do rotor e estator em coordenadas cartesianas

Onde:

- $x$ : eixo das abscissas.
- $y$ : eixo das ordenadas.
- $(x_0; y_0)$ : coordenadas cartesianas do centro das circunferências de referência.
- $R_e$ : raio do estator.
- $R_r$ : raio do rotor.

As medidas apresentadas na Tabela 10, de acordo com a instalação do sensor, são valores tomados referentes ao estator. Portanto, cada medida deve ser reescrita de forma a depender do raio do estator. Assim:

$$M_{estator} = R_e - M_{sensor} \quad (4.1)$$

Onde:

- $M_{estator}$ : medida referenciada ao centro do estator de referência, em milímetros.
- $R_e$ : raio do estator, em milímetros.
- $M_{sensor}$ : medida proveniente do sensor, em milímetros.

Nota-se que na equação (4.1), as medidas independem do ponto de instalação do sensor na circunferência do estator. Considera-se, também por hipótese, um raio de estator nominal igual a 15 (mm) e um entreferro nominal igual a 3 (mm), pode-se modificar as medidas de forma a serem referenciadas ao estator. A Tabela 11 apresenta as novas medidas.

Tabela 11 – Medidas do rotor de uma máquina síncrona de oito pólos salientes referenciadas ao estator

<i>Medida</i>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>7</i>	<i>8</i>	<i>9</i>
<i>Valor (mm)</i>	13,7	12,8	12,4	13,1	12,8	12,5	12,3	12,4	13,7

Os pólos, porém, não ocupam fisicamente a mesma posição sobre a circunferência do rotor. São separados então, um a um, por um ângulo:

$$d_p = \frac{360}{p} \quad (4.2)$$

Onde:

- $d_p$ : ângulo de separação entre os pólos, em graus.
- $p$ : número de pólos da máquina síncrona, adimensional.

Para oito pólos, tem-se:

$$d_p = \frac{360}{8} = 45^\circ$$

Com o valor do ângulo de separação entre os pólos em mãos deve-se calcular a posição em coordenadas cartesianas de cada medida. Para isto, basta converter os valores em coordenadas polares e depois convertê-los em coordenadas cartesianas (Interactive Mathematics, 2006). Para facilitar, utiliza-se a circunferência trigonométrica sobre as circunferências de referência para inserir as medidas com seus respectivos ângulos. A Tabela 12 apresenta os valores convertidos em coordenadas polares.

Tabela 12 – Medidas de uma máquina síncrona de oito pólos salientes referenciadas ao estator em coordenadas polares

<b>Medida</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>
<b>Raio (mm)</b>	13,7	12,8	12,4	13,1	12,8	12,5	12,3	12,4	13,7
<b>Ângulo (°)</b>	0	45	90	135	180	225	270	315	360

Convertido os valores de coordenadas polares para coordenadas cartesianas, os novos dados são apresentados na Tabela 13.

Tabela 13 – Medidas de uma máquina síncrona de oito pólos salientes referenciadas ao estator em coordenadas cartesianas

<i>Medida</i>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>7</i>	<i>8</i>	<i>9</i>
<i>x (mm)</i>	13,7	9,1	0,0	-9,3	-12,8	-8,8	0,0	8,8	13,7
<i>y (mm)</i>	0,0	9,1	12,4	9,3	0,0	-8,8	-12,3	-8,8	0,0

Inseridas as medidas da Tabela 13 no plano cartesiano, tem-se a Figura 37.

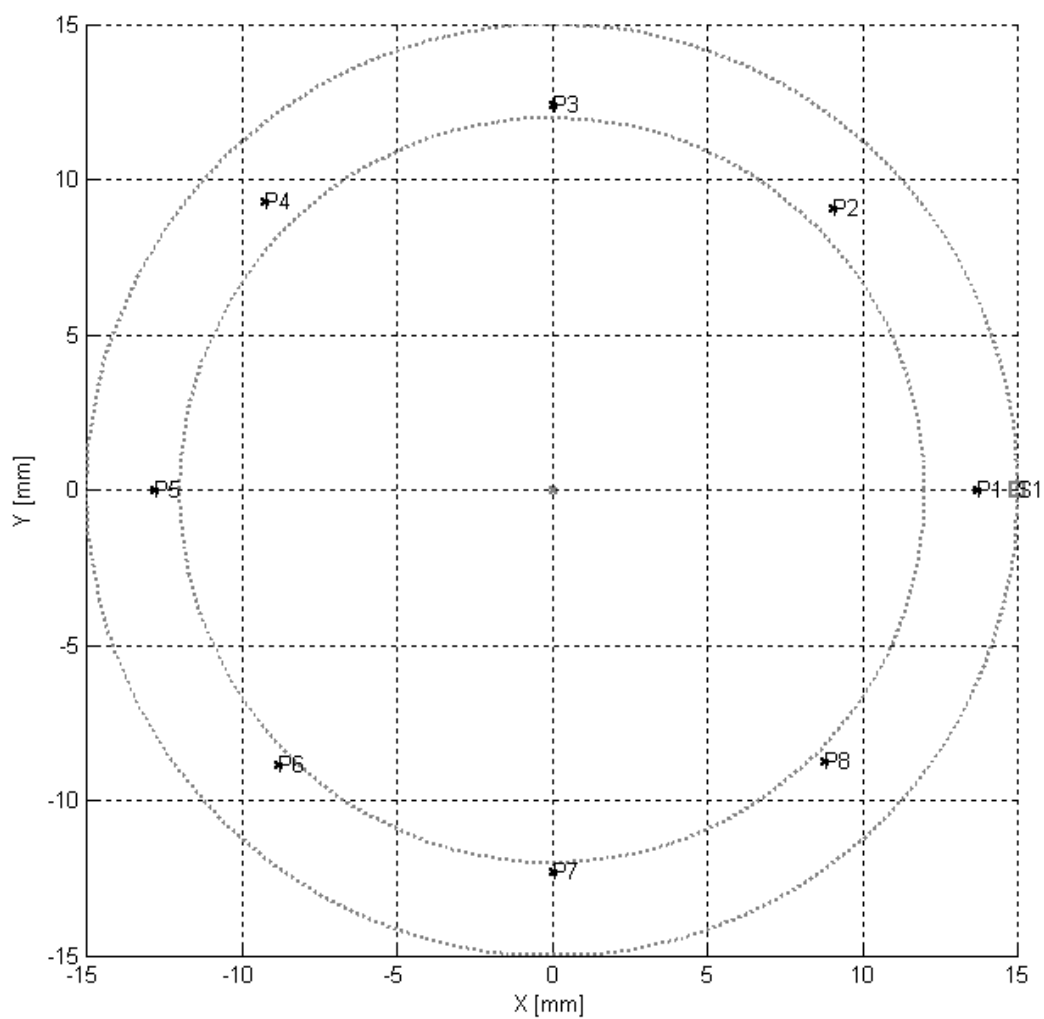


Figura 37 – Medidas inseridas no plano cartesiano

Onde:

- P1 a P8: medidas respectivas de cada pólo.
- S1: sensor 1.

Ao unir os pontos, gera-se um polígono para melhor visualização, conforme Figura 38.

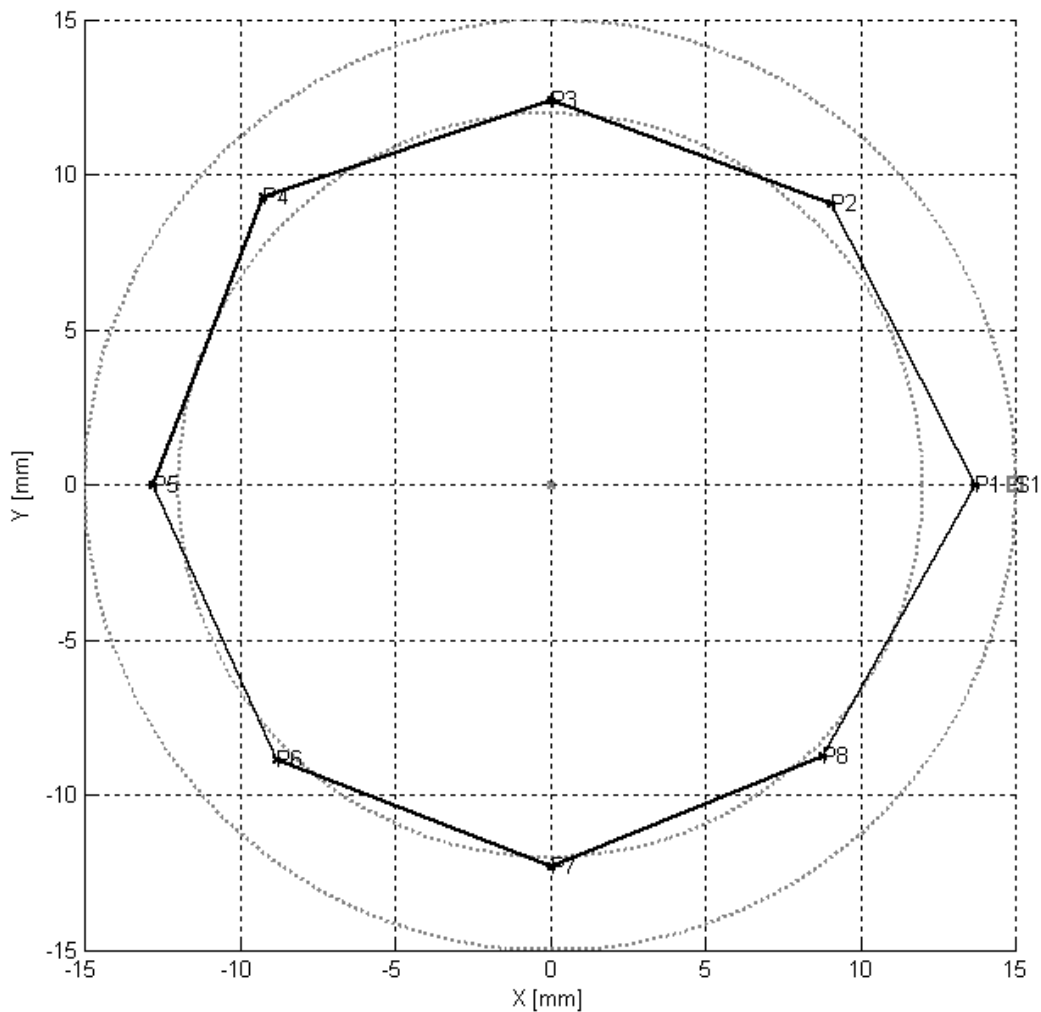


Figura 38 – Polígono resultante da união das medidas inseridas no plano cartesiano

A Figura 38, porém, não apresenta a forma real do rotor. Convém interpolar mais pontos utilizando uma *spline* (Godim, 2006), para obter uma forma geométrica mais próxima do real. A Figura 39 apresenta a forma suavizada do rotor.

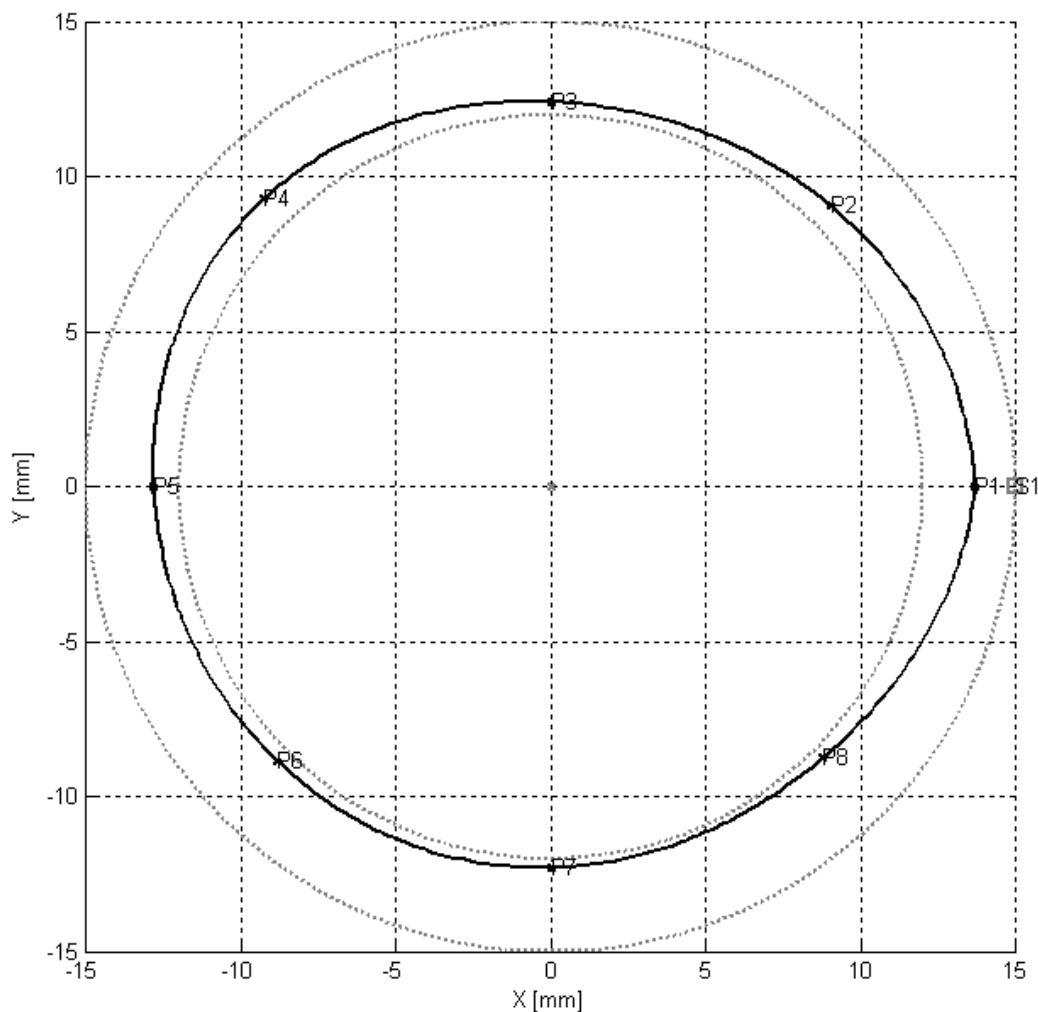


Figura 39 – Interpolação das medidas com spline

Na Figura 39, o rotor apresentou uma forma ovalizada em relação às circunferências de referência, tornando-se mais próxima à forma real do rotor que está na máquina síncrona. É importante ressaltar que com apenas uma única medida para cada pólo em uma única volta já foi possível avaliar sua forma geométrica. Caso sejam tomadas mais medidas durante uma mesma volta, a figura resultante será mais suave e mais próxima do rotor real, melhorando a precisão.

Para a geração das figuras anteriores, foi utilizado o software MATLAB versão 7.1 com Service Pack 3, de 2 de agosto de 2005. O código fonte criado para tais tarefas fora criado utilizando as funções já disponíveis no software. O código fonte para a determinação do rotor encontra-se no Anexo III.

## 4.2 Modelagem matemática do estator

A modelagem matemática do estator é baseada na modelagem do rotor, porém, é fortemente dependente da geometria da instalação dos sensores no estator para obter uma boa precisão.

Inicialmente, adotou-se que o sistema de aquisição de dados somente utilizasse um sensor para a determinação da circunferência do rotor. Porém, ao utilizar este único sensor, não é possível determinar a circunferência do estator. Isto ocorre porque o sensor realiza medições de entreferro tendo como referência a sua instalação física, conforme a Figura 40.

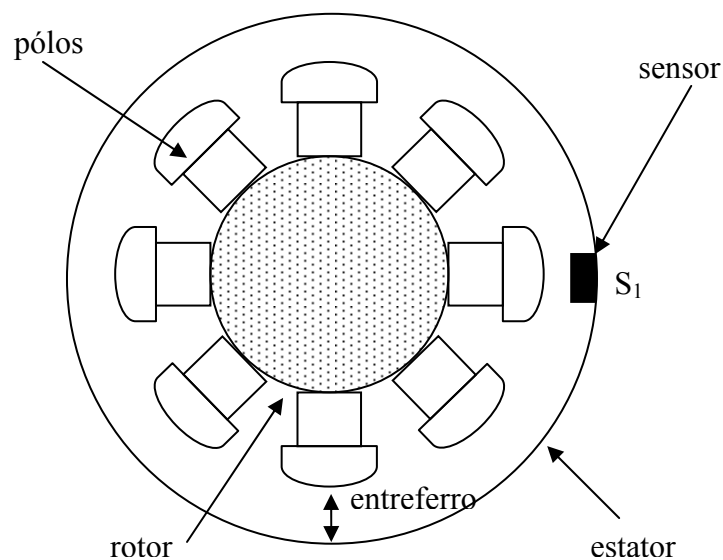


Figura 40 – Exemplo de sensor instalado na parede interna de uma máquina síncrona.

Para determinar a circunferência do estator, é preciso analisar a equação da circunferência:

$$(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 = R^2$$

(4.3)



Onde:

- $(x; y)$ : coordenadas cartesianas pertencentes à circunferência.
- $(x_0; y_0)$ : coordenadas cartesianas do centro da circunferência.
- $R$ : raio da circunferência.

A fim de encontrar as coordenadas do centro e o raio da circunferência, são necessárias três equações para se determinar estas três incógnitas, utilizando três conjuntos de pontos pertencentes à circunferência. Portanto, são necessários pelo menos três sensores para a determinação da deformação do estator.

Considere uma máquina síncrona com oito pólos salientes, cujo rotor apresenta uma circunferência perfeita e o estator uma circunferência deformada, representada pela Figura 41.

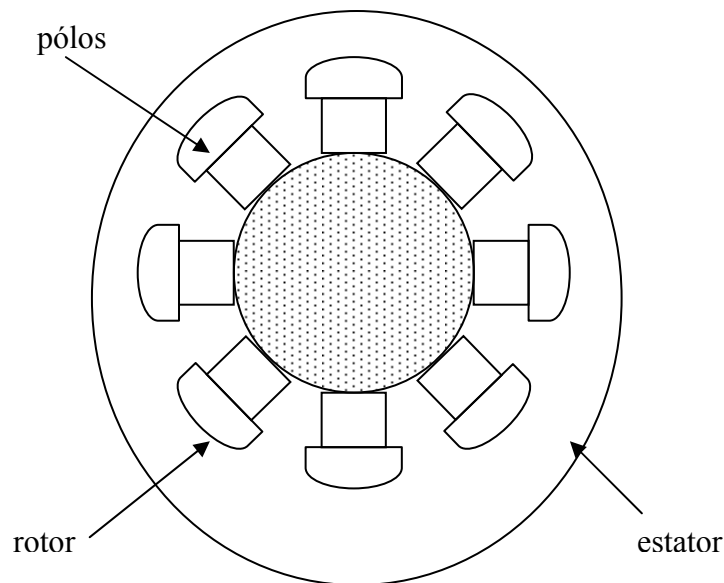


Figura 41 – Máquina síncrona com deformação no estator

Divide-se a circunferência do estator pelo número de sensores a serem instalados:

$$d_s = \frac{360}{N_s}$$

(4.4)

Onde:

- $d_s$ : distância entre os sensores a serem instalados, em graus.
- $N_s$ : número de sensores a serem instalados, adimensional.

Para três sensores, calcula-se  $d_s$ :

$$d_s = \frac{360}{N_s} = \frac{360}{3} = 120^\circ$$

Convenciona-se que o primeiro sensor S1 seja instalado no ângulo zero da circunferência de referência. Portanto, o sensor S2 será instalado a  $120^\circ$  de S1 e o sensor S3 será instalado a  $120^\circ$  de S2. A Figura 42 representa a instalação.

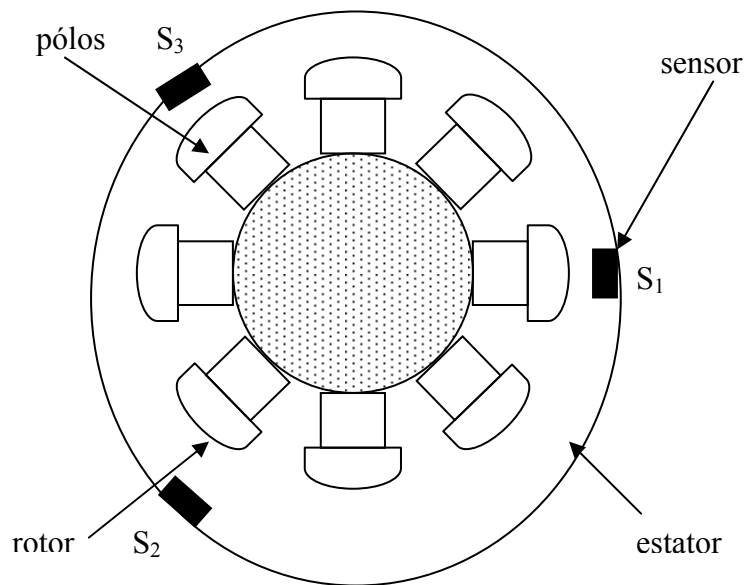


Figura 42 – Posicionamento dos sensores no estator

É preciso nomear os pólos, a fim de mudar a referência das medidas no tempo. A Figura 43 representa tal situação.

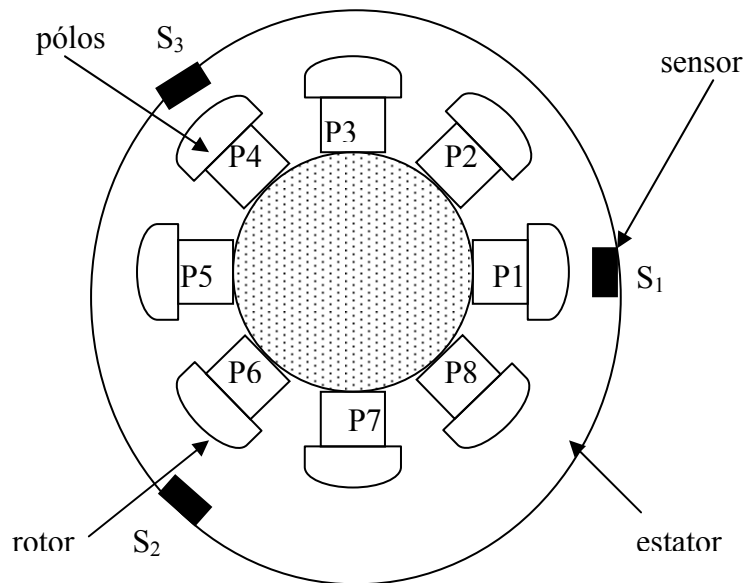


Figura 43 – Nomeação dos pólos

Nota-se na Figura 43 que a distância entre o sensor S1 e o pólo P1 é menor que a distância entre o sensor S2 e o pólo P6. Porém, se o rotor girar um pouco em torno do próprio eixo, no sentido horário, de forma que o pólo P1 esteja sobre o sensor S2 e o pólo P4 esteja sobre o sensor S1, tem-se uma nova representação do sistema, representada pela Figura 44.

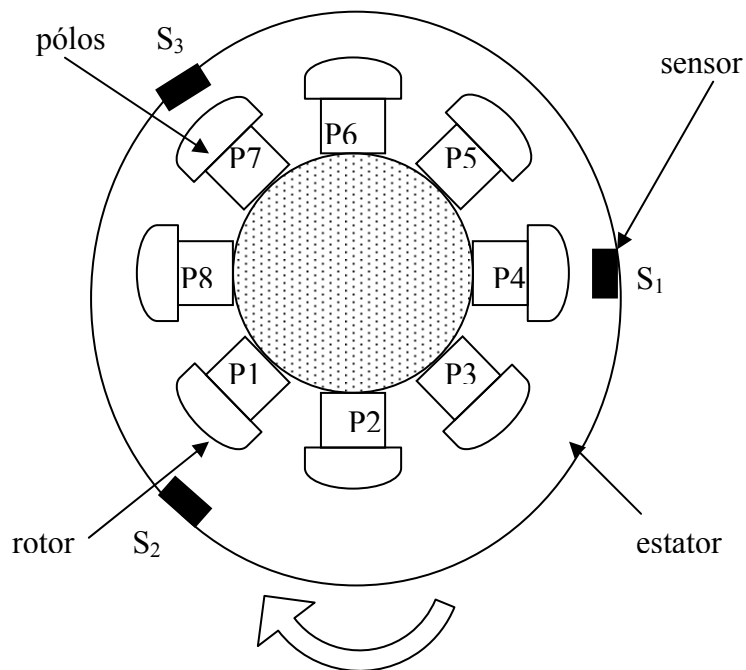


Figura 44 – Eixo do rotor após rotação

Na Figura 44, torna-se ainda mais claro que a medida do pólo P1 pelo sensor S2 será completamente diferente da medida do sensor S1 tomada na Figura 43. Partindo então da equação (4.1), tem-se:

$$M_{S1estator} = R_e - M_{S1}$$

$$M_{S2estator} = R_e - M_{S2}$$

$$M_{S3estator} = R_e - M_{S3}$$

Adota-se um sensor como referência, para realizar a diferença entre suas medidas e as medidas dos demais sensores:

$$M_{SNestator,DIFF} = M_{SREFestator} - M_{SNestator} \quad (4.5)$$

Onde:

- $M_{SNestator,DIFF}$ : diferença entre a medida do sensor de referência e o sensor  $S_N$ , em milímetros.
- $M_{SREFestator}$ : medida referenciada ao centro do estator de referência para o sensor de referência, em milímetros.
- $M_{SNestator}$ : medida referenciada ao centro do estator de referência para o sensor  $S_N$ , em milímetros.

Na equação (4.5), é de suma importância que ambos os conjuntos de medidas estejam ordenados por pólo. Desta maneira, será garantido que cada subtração será realizada para os mesmos pólos. Para a equação (4.5), três resultados são possíveis:

- **Resultado positivo**: significa que o sensor de referência  $M_{SREFestator}$  está mais afastado do que o outro sensor analisado.
- **Resultado negativo**: significa que o sensor de referência  $M_{SREFestator}$  está mais próximo do que o outro sensor analisado.
- **Resultado nulo**: significa que não há diferença entre as medidas dos dois sensores.

Ao utilizar a equação (4.5) para os três sensores, obtém-se:

$$M_{S2estator,DIFF} = M_{S1estator} - M_{S2estator}$$

$$M_{S3estator,DIFF} = M_{S1estator} - M_{S3estator}$$

Após a determinação das diferenças, é necessário calcular a posição correta dos sensores com base nas medições. Ao generalizar para qualquer sensor:

$$S_N = R_e - M_{S_Nestator,DIFF} \angle (n-1) \times d_s \quad (4.6)$$

Onde:

- $S_N$ : posição do sensor n dada em coordenadas polares, em milímetros.
- $R_e$ : raio nominal do estator, em milímetros.
- $M_{S_Nestator,DIFF}$ : diferença entre a medida do sensor de referência e o sensor  $S_N$ , em milímetros.
- n: número do sensor, adimensional.
- $d_s$ : distância entre os sensores a serem instalados, em graus.

Supondo que  $M_{S2estator,DIFF}$  seja +1 (mm) e que  $M_{S3estator,DIFF}$  seja -1 (mm), utiliza-se a equação (4.6) para determinar suas posições em coordenadas polares:

$$S_2 = 15 - 1 \angle -120^\circ = 14 \angle -120^\circ$$

$$S_3 = 15 + 1 \angle 120^\circ = 16 \angle 120^\circ$$

Ao inserir os três sensores no sistema de coordenadas cartesianas, tem-se a Figura 45.

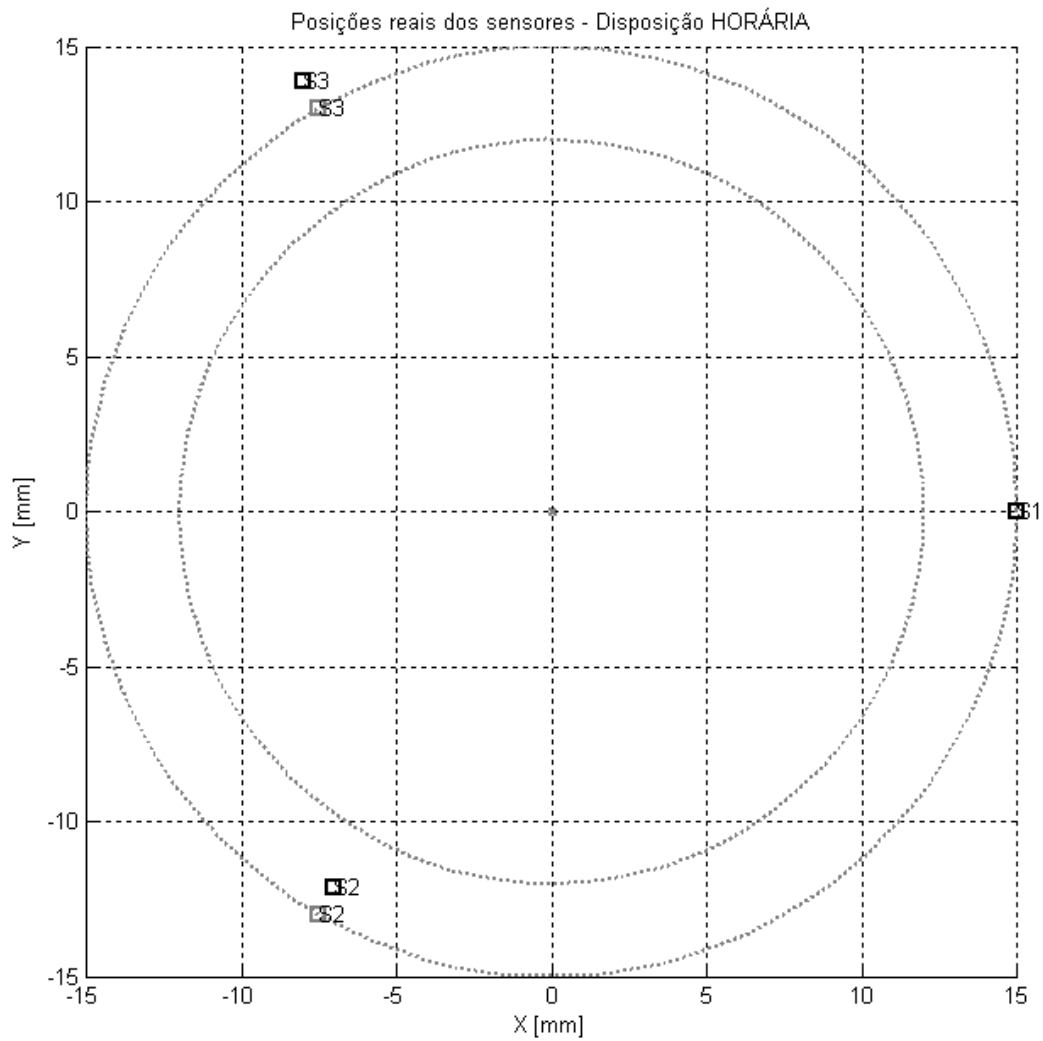


Figura 45 – Sensores inseridos

Nota-se que o sensor S2 ficou mais próximo da circunferência de referência do rotor, enquanto que o sensor S3 ficou mais afastado. Partindo das coordenadas dos três sensores, gera-se a circunferência real do estator utilizando uma *spline* para interpolação, representada na Figura 46.

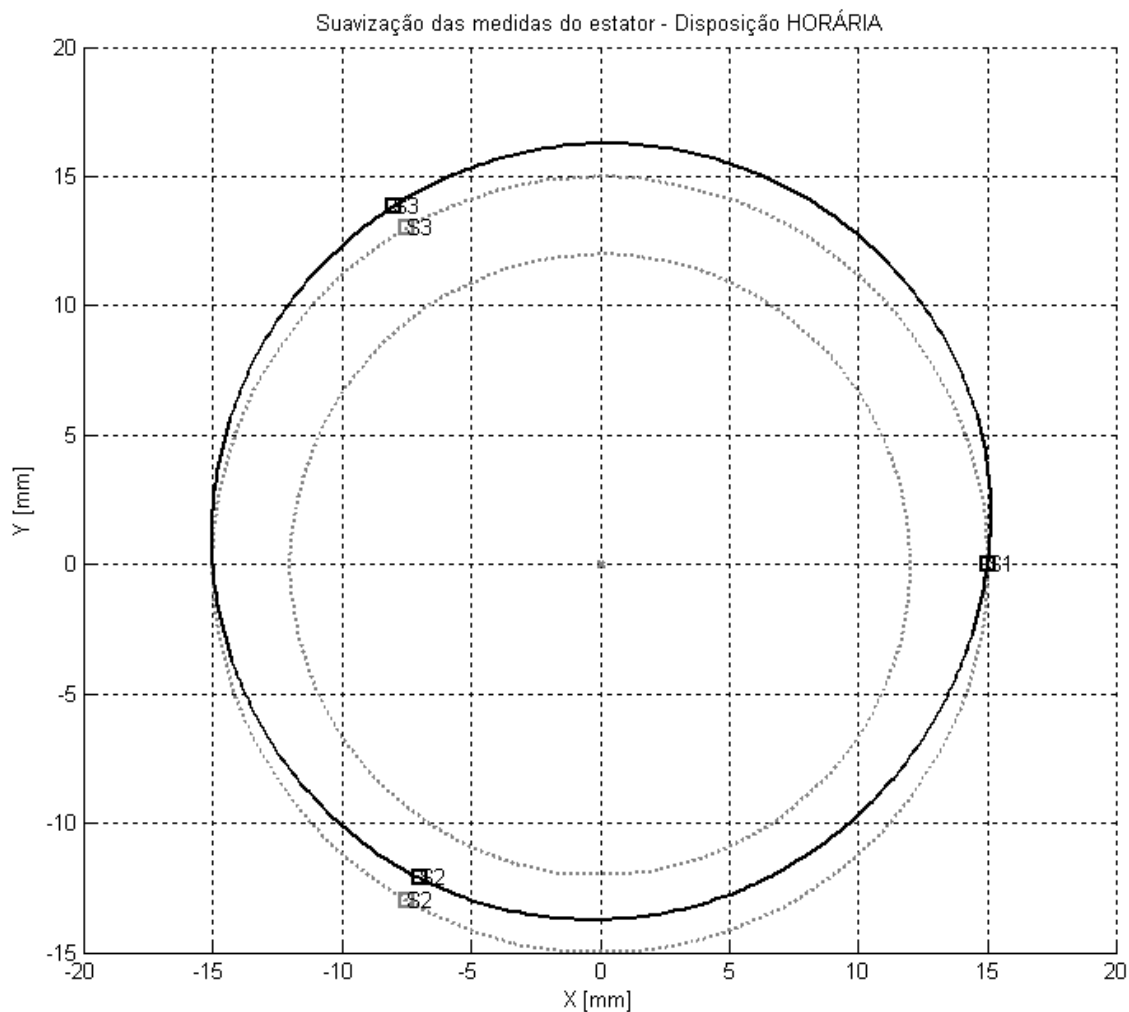


Figura 46 – Circunferência real do estator

Na Figura 46, a circunferência real do estator deslocou-se para cima, caracterizando uma deformação. Para melhorar a precisão na determinação da deformidade do estator, recomendam-se quantidades diferentes de sensores para diferentes valores do diâmetro do estator:

- Três sensores para máquinas com diâmetro do estator de até 3 (m).
- Quatro sensores para máquinas com diâmetro do estator de 3 a 16 (m).
- Oito sensores para máquinas com diâmetro do estator maior do que 16 (m).

O código fonte em MATLAB para a determinação do estator está no Anexo IV.

### **4.3 Determinação dos raios do rotor e estator**

Ao utilizar as circunferências determinadas do rotor e estator, é possível realizar várias análises sobre a máquina síncrona.

Uma análise interessante é a determinação dos raios do rotor e do estator. Em máquinas onde as dimensões são muito grandes, é difícil realizar tais medidas. Assim, a determinação do raio do rotor e do estator através dos dados adquiridos se torna bastante atrativa.

Para determinar o raio de cada circunferência é necessário determinar qual a melhor circunferência que se ajusta aos dados adquiridos em uma determinada volta. Existem várias propostas para sua determinação (Chernov et alii, 2005) (Maisonobe, 2005) (Umbach e Jones, 2003), onde se utiliza os mínimos quadrados para realizar iterações. Umbach e Jones (2003) realizaram análises sobre a eficiência de alguns métodos para determinação de circunferências. Naquele trabalho, os métodos MLS – *modified least squares* (mínimos quadrados modificado) e o método de Kâsa são os mais robustos frente a medidas errôneas. Ambos os métodos também apresentam menor custo de processamento de um computador para calcular o raio e o centro da circunferência.

A partir do método MLS, foi criado um código em MATLAB para a determinação do raio e das coordenadas do centro da circunferência do rotor. O Anexo V apresenta o código fonte, que deve ser inserido no final do código fonte do rotor apresentado no Anexo III.

Ao executar o código, será gerada a Figura 47.



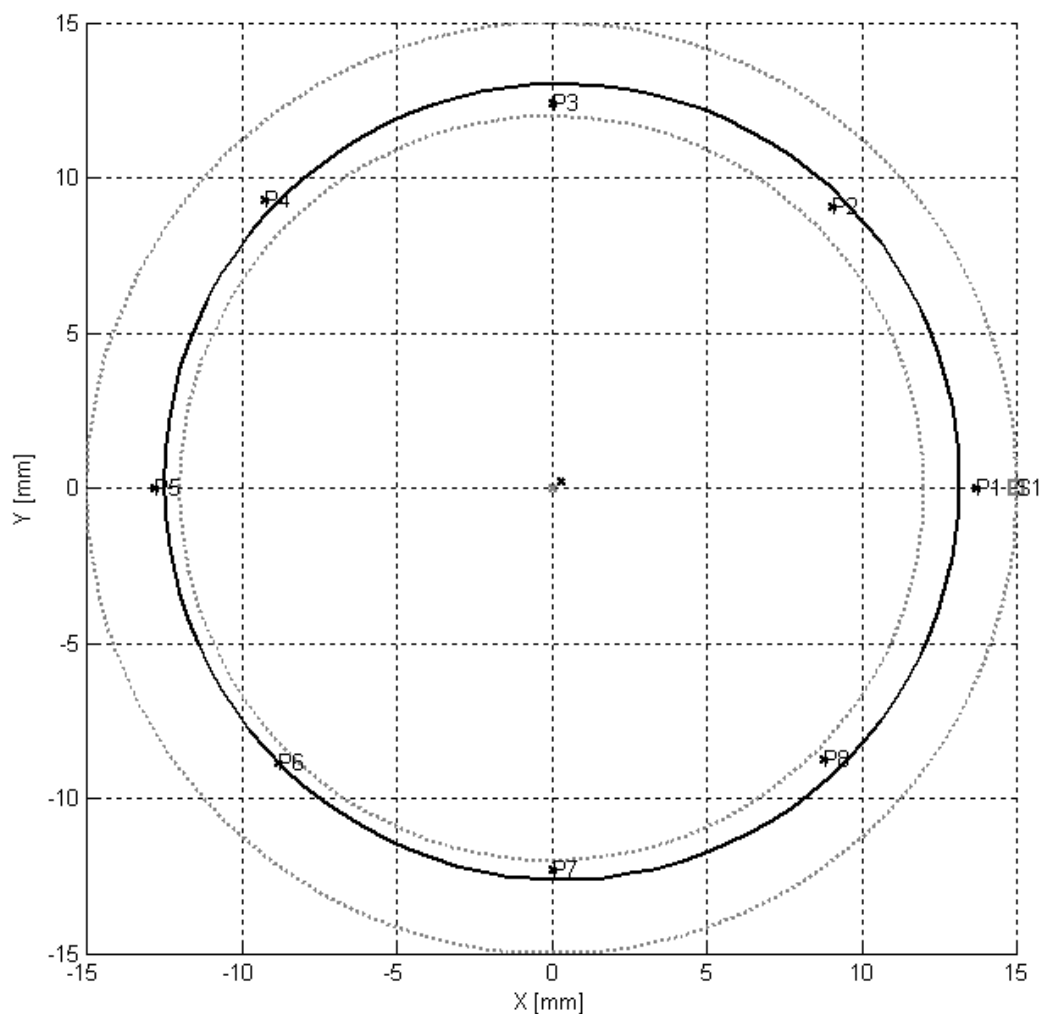


Figura 47 – Circunferência do rotor e seu centro calculados pelo método MLS

Da Figura 47, o centro da circunferência e o raio são apresentados na Tabela 14.

Tabela 14 – Propriedades da circunferência do rotor calculadas pelo método MLS

<i>Raio (mm)</i>	<i>Centro X (mm)</i>	<i>Centro Y (mm)</i>
12,8227	0,3204	0,2055

Para a determinação da circunferência do estator, o código fonte apresentado no Anexo VI também deve ser inserido no final do código do estator apresentado no Anexo IV. Ao executar o código, obtém-se a seguinte Figura 48.

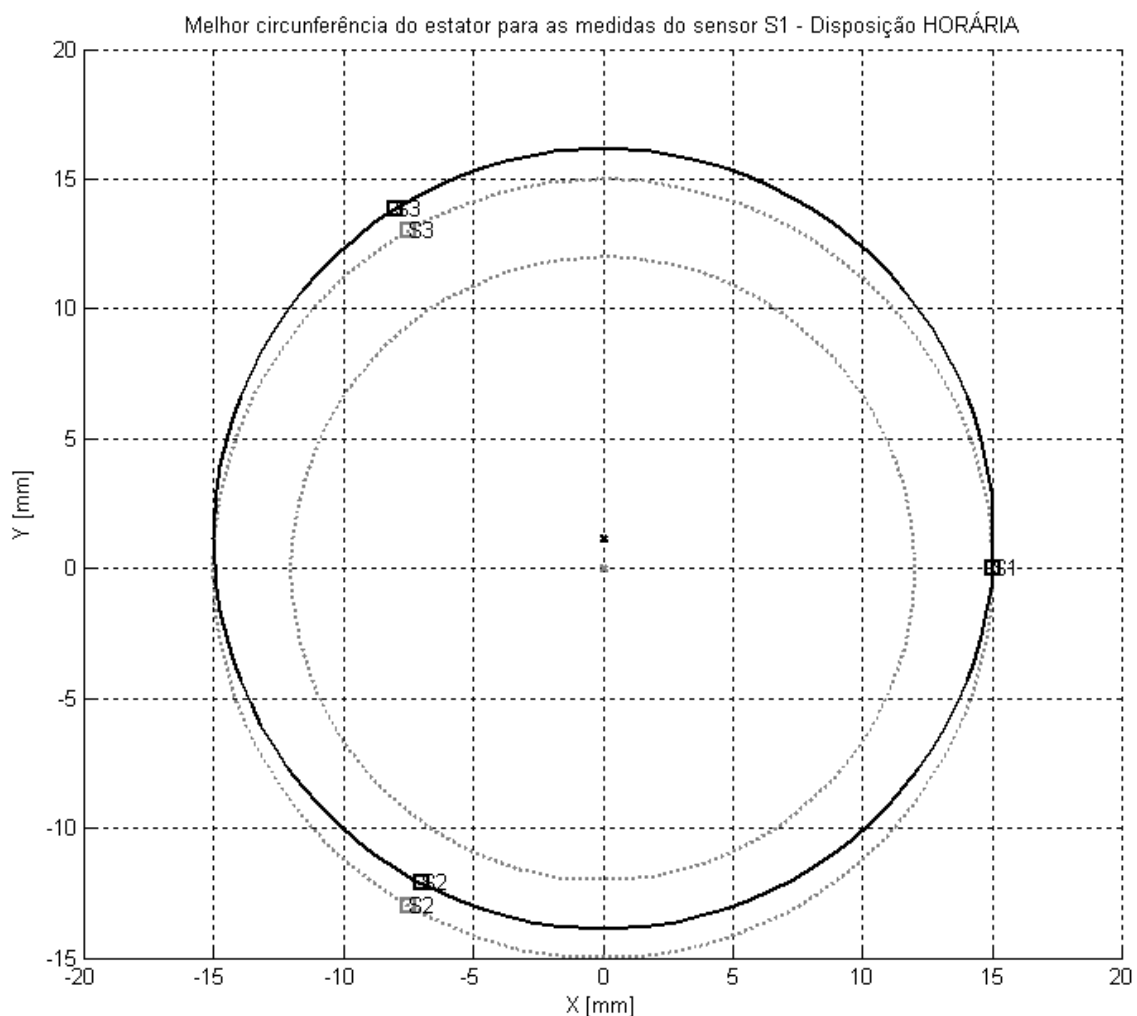


Figura 48 – Circunferência do estator e seu centro calculados pelo método MLS

Da Figura 48, o centro da circunferência do estator e seu raio são apresentados na Tabela 15.

Tabela 15 – Propriedades da circunferência do estator calculadas pelo método MLS

<i>Raio (mm)</i>	<i>Centro X (mm)</i>	<i>Centro Y (mm)</i>
15,0222	0,0222	1,1556

Ambos os resultados do rotor e estator ficaram próximos dos valores considerados por hipótese.

## **5 Implementação do sistema**

Neste capítulo é apresentado o projeto do medidor de capacitância utilizando o CAV424 e sua avaliação perante capacitores comerciais. A instalação dos sensores capacitivos e dos medidores de capacitância no gerador número dois da PCH Luís Dias e a análise dos dados obtidos durante o funcionamento desta máquina também são apresentados.

### **5.1 Projeto do medidor de capacitância**

A fim de realizar o monitoramento do entreferro, é necessário um circuito eletrônico de medição de capacitância para ser utilizado juntamente com os capacitores planos já projetados. Com o intuito de utilizar novas tecnologias, optou-se pelo uso do circuito integrado CAV424 (Fischer, 2002) citado anteriormente no Capítulo 3. Tal circuito é capaz de medir capacitâncias da ordem de 0,5 (pF) até 2 (nF), sendo possível então utilizá-lo com os capacitores planos já projetados.

A Tabela 16 apresenta a pinagem do circuito integrado CAV424.

Tabela 16 – Descrição dos pinos do CAV424

<i>Pino</i>	<i>Nome</i>	<i>Descrição</i>
1	RCOSC	Resistor que define a corrente do oscilador de referência
2	RCX1	Resistor que ajusta a corrente do integrador do capacitor CX1
3	RCX2	Resistor que ajusta a corrente do integrador do capacitor CX2
4	RL	Resistor para ajuste de ganho na saída
5	LPOUT	Resposta da medição
6	VM	Tensão interna de referência
7	VTEMP	Sensor de temperatura
8	N.C.	Pino não conectado
9	N.C.	Pino não conectado
10	GND	Tensão comum/terra
11	VCC	Tensão de alimentação
12	COSC	Capacitor do oscilador de referência
13	CL2	Capacitor de frequência de corte do filtro passa baixa de CX2
14	CX2	Capacitor a ser medido
15	CL1	Capacitor de frequência de corte do filtro passa baixa de CX1
16	CX1	Capacitor de referência

Os capacitores e resistores utilizados precisam ser variados para ajustar o funcionamento do circuito integrado. Portanto, convém criar um circuito impresso que permita a variação desses elementos.

Primeiramente, fixam-se os resistores RCOSC e RCX1 com os valores típicos recomendados de 250 (k $\Omega$ ) e 500 (k $\Omega$ ) respectivamente. Para o resistor RCX2 utilizou-se um potenciômetro, que deve ser usado para ajuste de zero quando CX1 e CX2 forem muito próximos ou apresentarem o mesmo valor. Para tal, deve-se variar RCX2 até que a diferença de tensão na saída, LPOUT-VM, seja zerada.

O resistor RL usado para ajuste de ganho na saída é composto por dois resistores: RL1 e RL2. RL1 deve ser conectado aos pinos 4 e 5 e RL2 deve ser conectado aos pinos 4 e 6. Conforme informações do fabricante, o ganho máximo permitido é 10 e seu cálculo é dado por:

$$G_{LP} = 1 + \frac{RL1}{RL2} \quad (5.1)$$

Assim, a divisão de RL1 por RL2 deve resultar em no máximo 9. Além disto, a soma destes dois resistores não pode ser menor que 90 (kΩ) e maior que 200 (kΩ). Para obter o ganho máximo e ao mesmo tempo respeitar os parâmetros do circuito integrado, empregou-se um potenciômetro de 100 (kΩ), que foi ajustado para fornecer em suas extremidades uma resistência de 90 (kΩ) para RL1 e 10 (kΩ) para RL2.

Finalmente, os capacitores devem ser determinados em função da capacitância de referência CX1. Para a inserção das capacitâncias necessárias ao funcionamento do circuito, quatro conectores DIP8 foram empregados. As capacitâncias são calculadas pelas seguintes equações:

$$COSC = 1,6 \times CX1 \quad (5.2)$$

$$CL1 = 200 \times CX1 \quad (5.3)$$

$$CL2 = 200 \times CX1 \quad (5.4)$$

O valor recomendado pelo fabricante da capacitância CVM é de 100 (nF). A Figura 49 apresenta o *layout* final do circuito impresso.

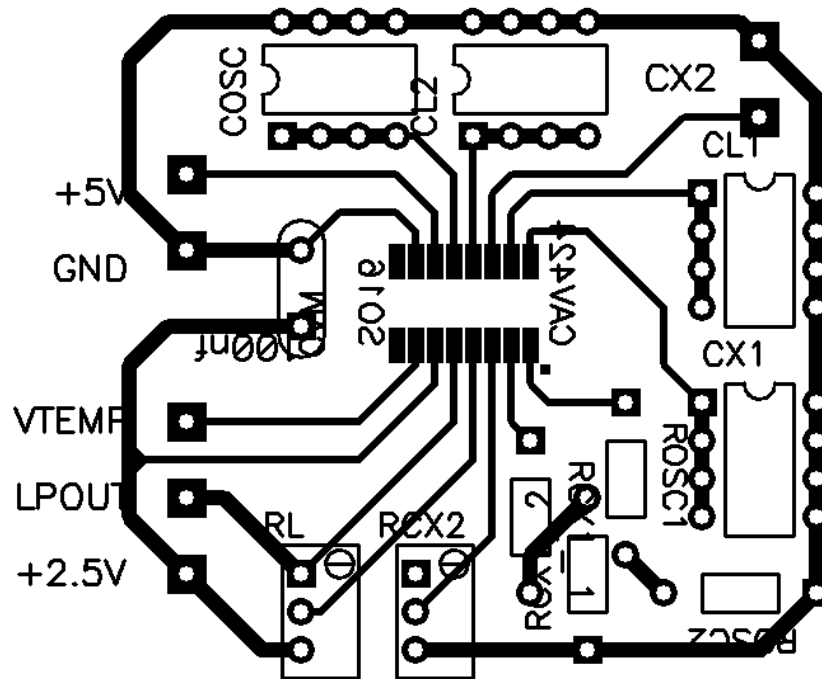


Figura 49 – *Layout* final do circuito impresso do medidor de capacitância

O *layout* apresentado na Figura 49 pode ser utilizado como base para se construir outras placas de circuito impresso para o CAV424. Conforme projetado, é versátil por permitir a variação dos parâmetros mais importantes do circuito.

A Figura 50 apresenta a vista superior do circuito impresso final construído.

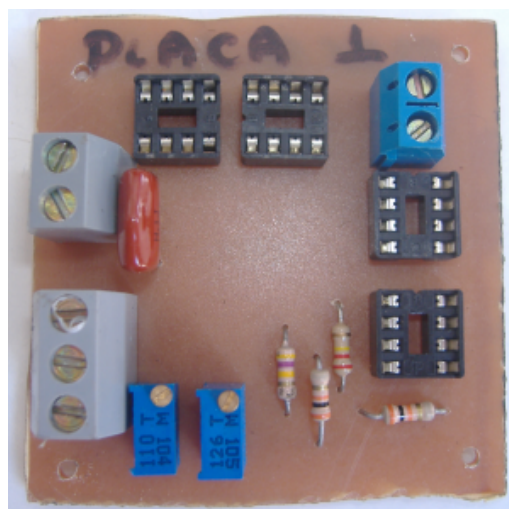


Figura 50 – Vista superior do circuito impresso final

É importante notar que por se tratar de uma placa de circuito impresso de face simples, os conectores, resistores e capacitores se encontram na face superior enquanto

que o CAV424 estará na face inferior juntamente com as trilhas condutoras. Isso acontece porque o CAV424 é comercializado no encapsulamento SO16, que permite soldagem somente na mesma face em que se encontra o integrado. A Figura 51 apresenta o circuito integrado CAV424 soldado na face inferior do circuito impresso.

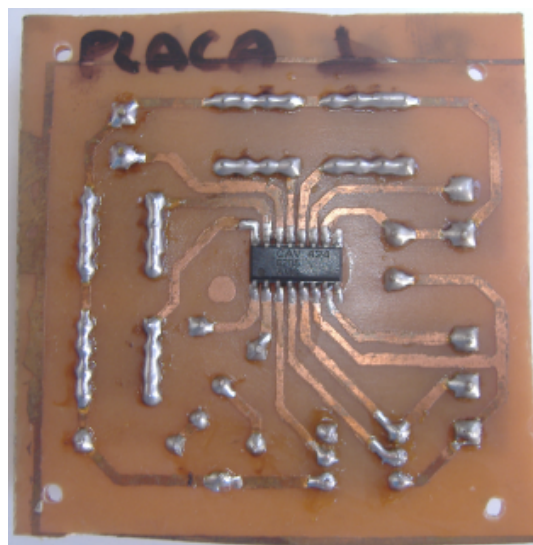


Figura 51 – Vista inferior do circuito impresso final

## **5.2 Avaliação do medidor de capacitância**

Para avaliar o medidor de capacitância construído, analisou-se sua resposta para vários capacitores comerciais utilizando quatro capacitores de referência. A tensão na saída foi utilizada nas equações apresentadas em (Fischer, 2002) para se calcular o valor da capacitância obtida através da medição. A Tabela 17 e a Figura 52 apresentam as medidas em uma tabela e em forma de gráfico, respectivamente.

Tabela 17 – Medidas obtidas de capacitores comerciais utilizando o medidor de capacitância

<i>CX1</i> (pF)	<i>VDIFF</i> (V)	<i>Capacitor comercial</i> (pF)	<i>Valor obtido</i> (pF)	<i>Erro</i> (%)
10	0,036	10	10,1	1,0
	1,29	15	16,6	10,7
22	0,53	25	25,5	2,0
	0,91	27	28,4	5,2
	1,09	28	29,9	6,8
	1,65	32	35,6	11,3
27	0,38	30	29,7	-1,0
	0,96	33	34,6	4,8
	1,55	37	40,9	10,5
68	0,54	78	75,7	-2,9
	0,56	82	76	-7,3
	0,86	83	81	-2,4
	1,32	90	90	0,0
	1,73	100	99,6	-0,4

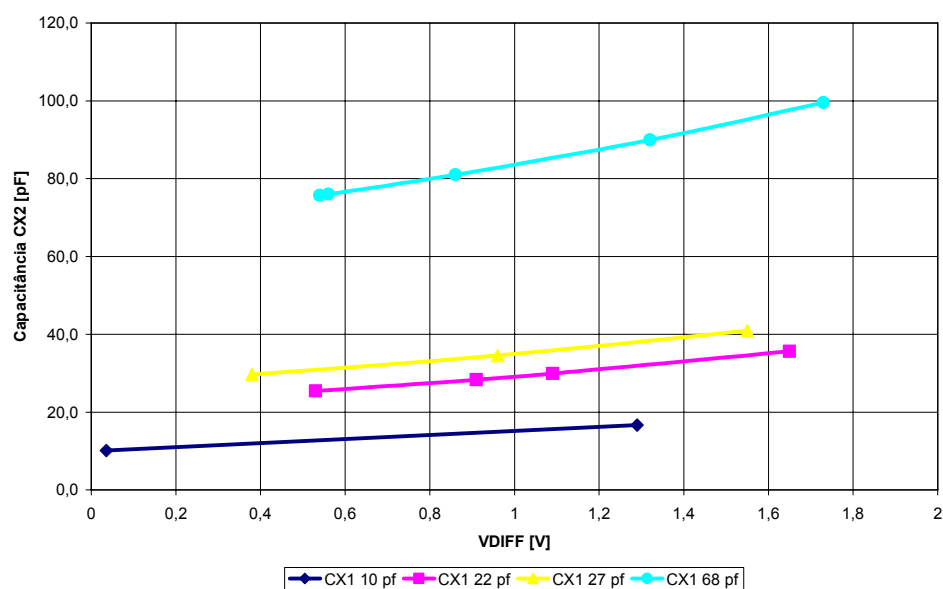


Figura 52 – Resposta do medidor de capacitância para quatro capacitâncias de referência CX1 diferentes



### 5.3 Instalação do sistema e coleta de dados

A fim de avaliar o medidor de capacitância aplicado no monitoramento do entreferro de uma máquina síncrona de pólos salientes, optou-se por monitorar o gerador 2 da Pequena Central Hidrelétrica (PCH) Luiz Dias, localizada na zona rural de Itajubá-MG. A Figura 53 apresenta o gerador em questão.



Figura 53 – Gerador 2 da PCH Luiz Dias

As características do gerador 2 estão apresentadas na Tabela 18.

Tabela 18 – Características do gerador 2

<i>Frequência</i>	60 (Hz)
<i>Velocidade</i>	720 (rpm)
<i>Pólos</i>	10

Sabe-se que são necessários pelo menos três sensores capacitivos a serem instalados no entreferro, foram instalados três sensores no gerador 2, espaçados a cada 120 graus, cujo esquema é representado pela Figura 54.

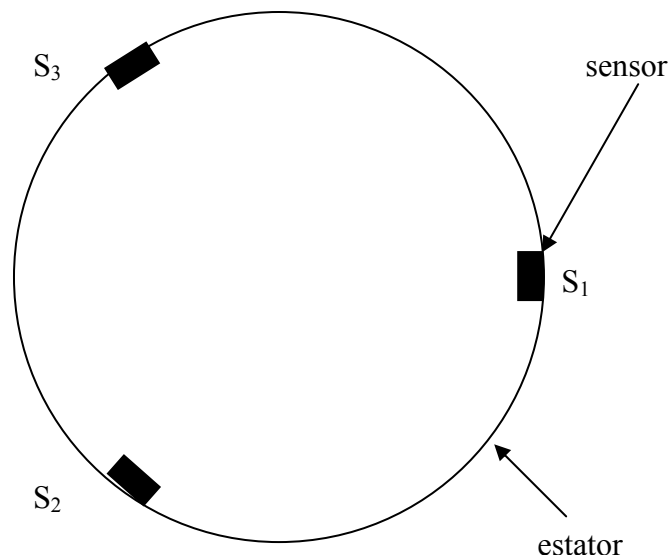


Figura 54 – Diagrama de instalação dos sensores no gerador 2

Após limpar o estator, os sensores foram fixados utilizando uma cola de vedação. A Figura 55 apresenta um sensor capacitivo fixado no estator.



Figura 55 – Sensor capacitivo fixado na parede do estator

Após o período de secagem da cola, o gerador 2 voltou a operar durante duas semanas. Neste período nenhuma anomalia foi reportada em função dos capacitores instalados. Durante este período de observação, quatro placas medidoras de capacitância foram confeccionadas e testadas, além da criação de um sensor de rotação.

Infelizmente, ao retornar à usina para a instalação do sistema de aquisição de dados, notou-se que dois dos três capacitores fixados no estator estragaram durante o período de operação. A fixação não foi adequada, pois não foi possível retirar o rotor para a instalação dos sensores, que prejudicaria a geração de energia pela PCH. Portanto, a maneira correta de se instalar tais sensores deve ser feita sem a presença do rotor. A Figura 56 apresenta o capacitor remanescente.



Figura 56 – Sensor capacitivo remanescente após período de fixação

Entretanto, o capacitor remanescente foi instalado no medidor de capacitância através de um cabo blindado com dois condutores. Para fixar os terminais do cabo no capacitor, foram utilizados dois cliques. A Figura 57 apresenta os terminais.

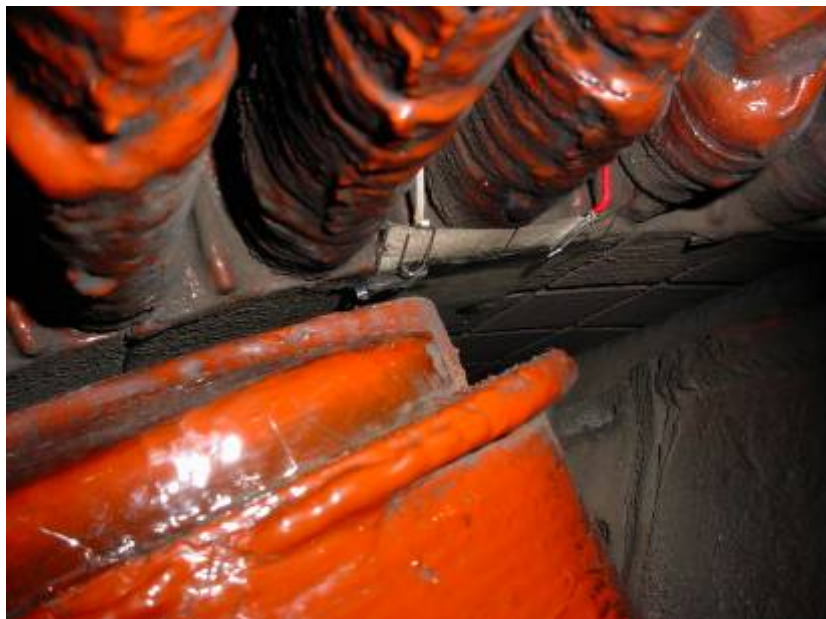


Figura 57 – Terminais conectados no capacitor

O cabo para a medição foi fixado na carcaça do gerador, e os condutores foram passados por entre os enrolamentos do estator, conforme apresentado na Figura 58.



Figura 58 – Detalhe da fixação do cabo blindado

O cabo então foi fixado na armadura da máquina, até encontrar o sistema de aquisição de dados, conforme a Figura 59.



Figura 59 – Detalhe do cabo fixado na armadura do gerador

Para a aquisição de dados, foi utilizado um *notebook* equipado com uma placa de aquisição de dados com 16 bits de resolução e software específico para a aquisição, representado pela Figura 60.

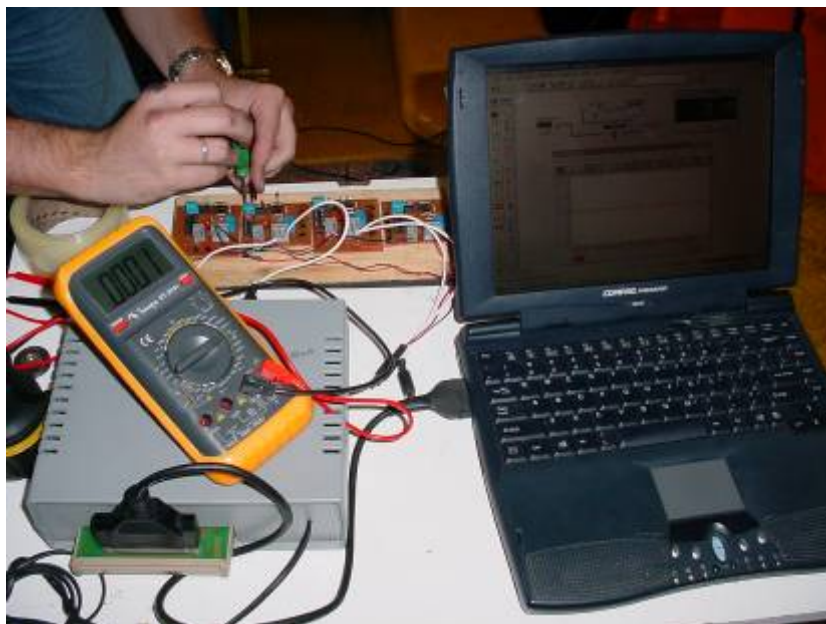


Figura 60 – Sistema de aquisição de dados

Devido à ordem de grandeza do capacitor e a capacitância intrínseca do cabo empregado, o medidor de capacitância foi configurado com:

$$CX1 = 68 \quad (\text{pF})$$

$$COSC = 1,6 \times CX1 = 108,8 \quad (\text{pF})$$

$$CL1 = 1 \quad (\text{nF})$$

$$CL2 = 1 \quad (\text{nF})$$

As capacitâncias de corte, CL1 e CL2 foram escolhidas de forma que a frequência de detecção da variação da capacitância fosse máxima, aproximadamente em torno de 2 (kHz). Essa frequência de detecção é necessária devido à velocidade de operação do gerador, que é 720 (rpm). Assim, transformando as rotações por minuto ( $V_{RPM}$ ) para rotações por segundo ( $V_{RPS}$ ), tem-se:

$$V_{RPS} = \frac{V_{RPM}}{60} \quad (5.5)$$

Onde:

- $V_{RPS}$ : rotações por segundo, em (rps).
- $V_{RPM}$ : rotações por minuto, em (rpm).

Ao calcular  $V_{RPS}$ , tem-se:

$$V_{RPS} = \frac{V_{RPM}}{60} = \frac{720}{60} = 12 \quad (\text{rps})$$

O tempo necessário para uma volta completa do rotor,  $t_v$ , é:

$$t_v = \frac{1}{V_{RPS}} \quad (5.6)$$

Onde:

- $t_v$ : tempo necessário para ocorrer uma volta completa do rotor, em milissegundos.
- $V_{RPS}$ : rotações por segundo, em rps.

Ao calcular  $t_v$ , tem-se:

$$t_v = \frac{1}{V_{RPS}} = \frac{1}{12} \approx 83,333 \quad (\text{ms})$$

Já o tempo necessário para cada pólo ser detectado pelo sensor,  $t_p$ , será:

$$t_p = \frac{t_v}{p}$$

(5.7)

Onde:

- $t_p$ : tempo necessário para ocorrer a detecção de um pólo, em milissegundos.
- $t_v$ : tempo necessário para ocorrer uma volta completa do rotor, em milissegundos.
- $p$ : número de pólos da máquina síncrona, adimensional.

Ao calcular  $t_p$ , tem-se:

$$t_p = \frac{t_v}{p} = \frac{83,333}{10} = 8,333 \quad (\text{ms})$$

Isso significa que a cada 8,333 (ms), o sistema de aquisição de dados detectará um pólo. Então, ao comparar a frequência de detecção do medidor de capacitância ( $f_{DET}$ ) com o tempo de detecção de cada pólo,  $t_p$ , tem-se:

$$f_{DET} \gg \frac{1}{t_p}$$

(5.8)

Ao inserir os valores:

$$2000 \gg \frac{1}{8,333 \times 10^{-3}}$$

$$2000 \gg 120$$

Assim, a frequência de detecção é aproximadamente 17 vezes maior do que a frequência de passagem de um pólo. Portanto,  $f_{DET}$  está de acordo com o teorema de Nyquist, onde a frequência de amostragem deve ser pelo menos o dobro da frequência do sinal a ser amostrado. Assim, a mudança nos capacitores CL1 e CL2 são justificadas.

Na experiência realizada, o sensor de rotação não foi instalado devido problemas técnicos. Portanto, somente foi aquiritada a variação da capacitância durante o funcionamento do gerador.

A coleta de dados forneceu 8704 amostras. A Figura 61 apresenta os dados coletados na forma de um gráfico.



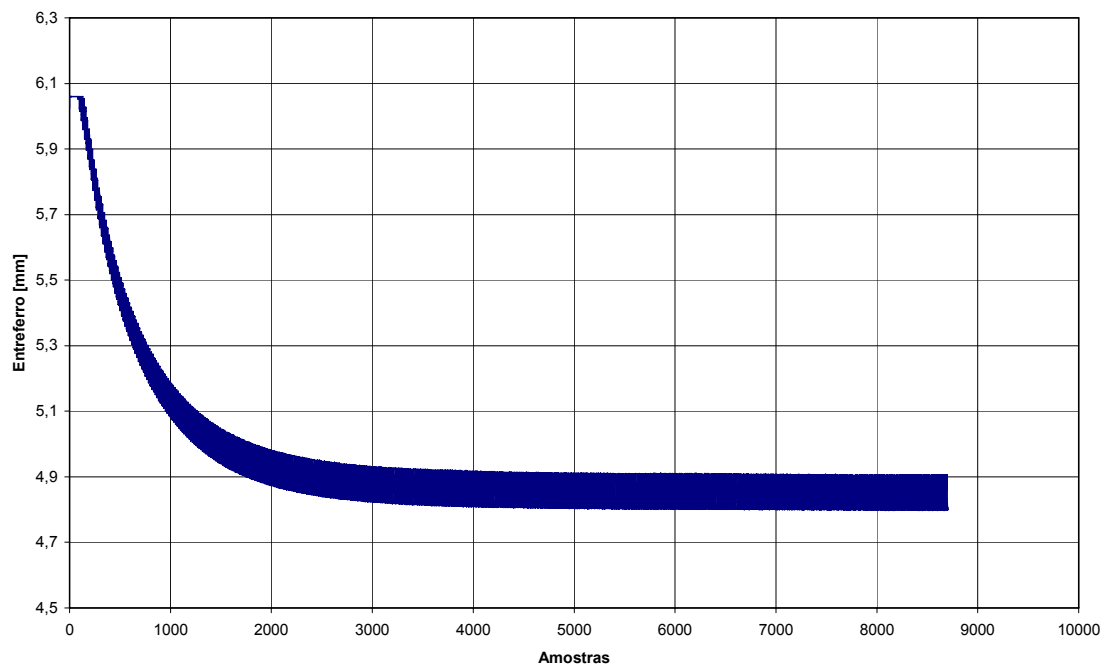


Figura 61 – Dados coletados

Na Figura 61 nota-se que no início da aquisição, o entreferro apresenta um valor maior do que quando o gerador está em regime permanente. Para a melhor visualização desta ocorrência, um trecho da aquisição é representado pela Figura 62.

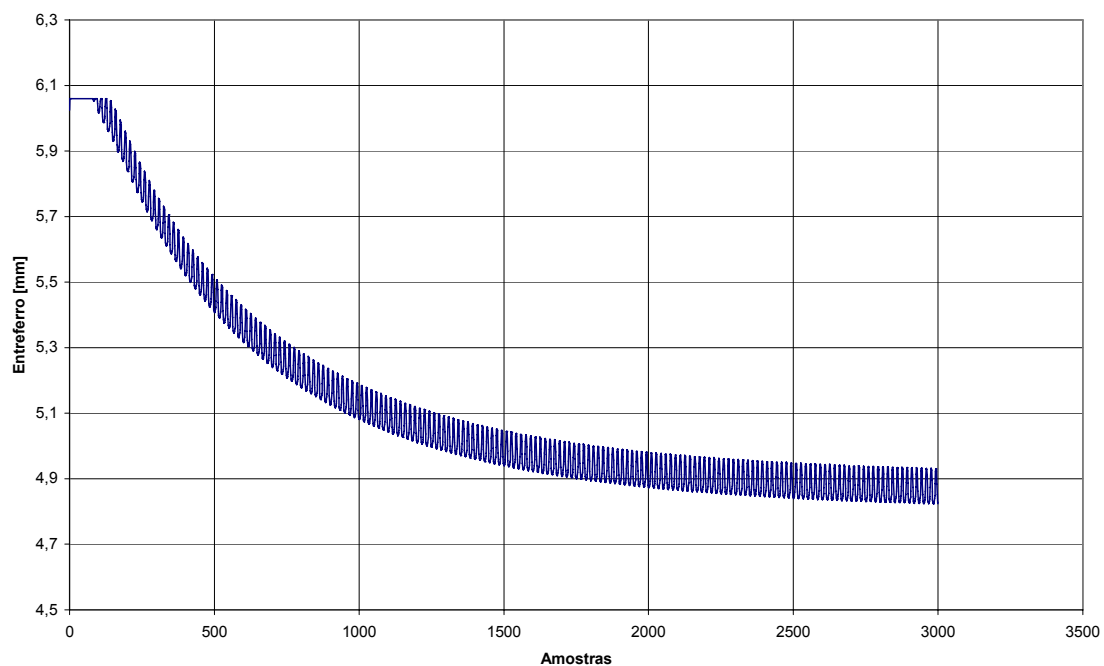


Figura 62 – Diminuição do entreferro durante a partida da máquina

Ao girar do rotor, o entreferro diminui com o tempo, até que durante alguns segundos de funcionamento, estabiliza-se em um valor.

Com o propósito de obter mais detalhes, seleciona-se um pequeno trecho dos valores para gerar a Figura 63.

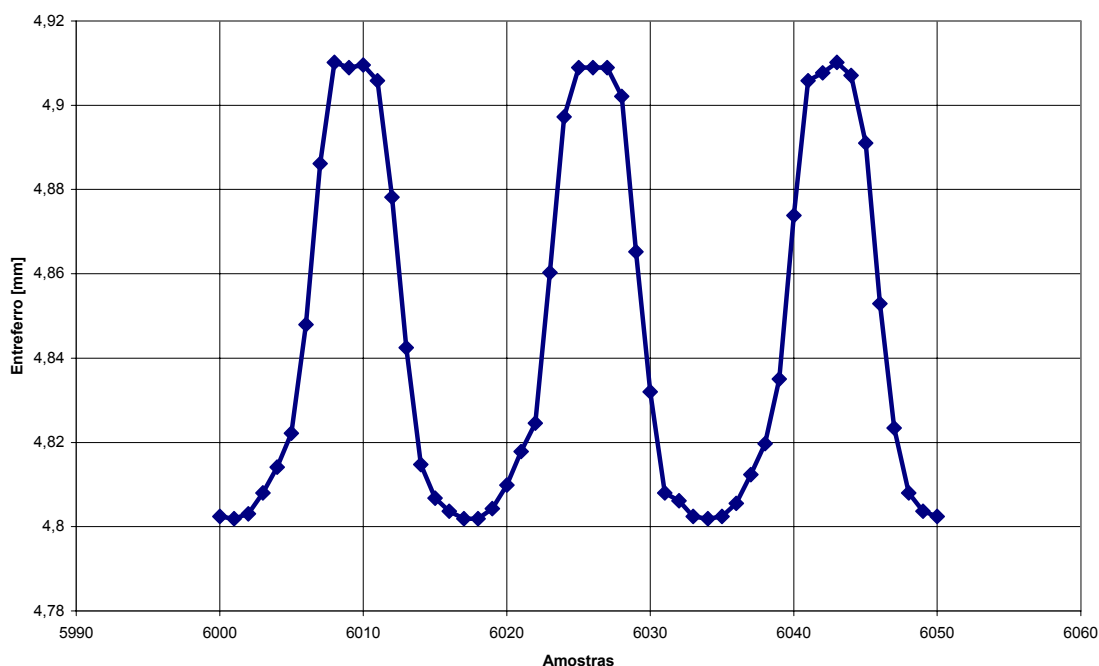


Figura 63 – Dados coletados em detalhe

Na Figura 63, os dados aquisitados aparentam uma forma de onda. Este resultado era esperado, pois quando a distância é menor, o pólo está sobre o sensor. Quando a distância é maior, o sensor está sobre a região entre dois pólos. Portanto, o valor máximo do sinal é a região entre os pólos, enquanto que o valor mínimo representa a distância do sensor ao pólo. Esta informação está apresentada na Figura 64.

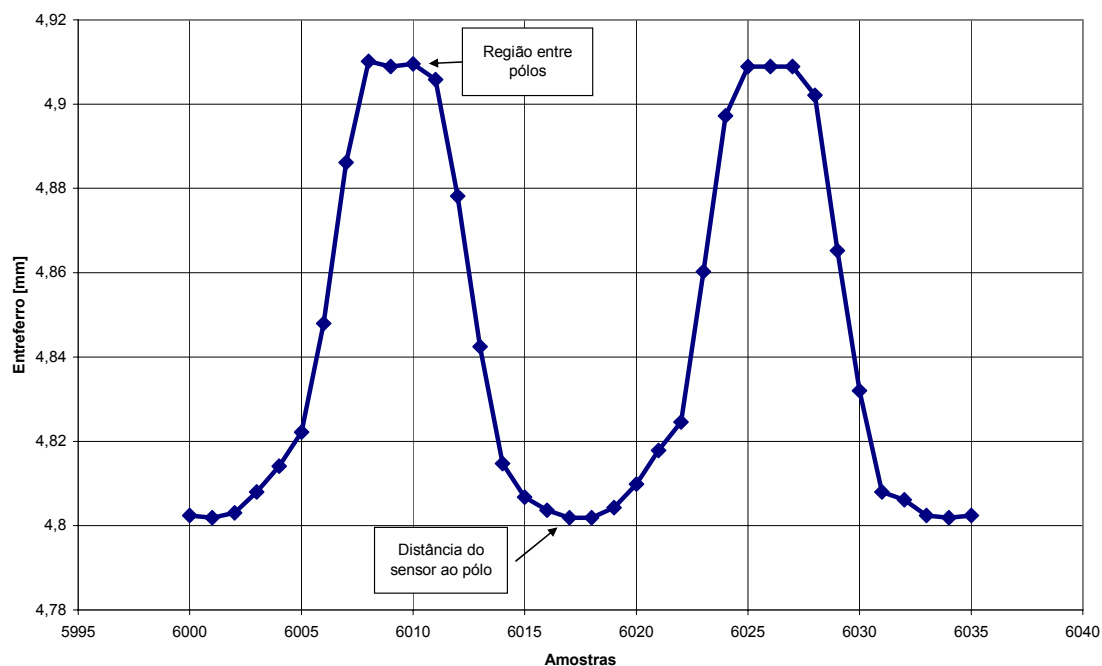


Figura 64 – Detalhe dos máximos e mínimos do sinal adquirido

É importante notar também na Figura 64, que o máximo do sinal representa graficamente uma fossa invertida, sendo comparável com a profundidade existente no espaço entre pólos. Já o mínimo do sinal representa graficamente um plano, que pode ser comparado com a parte superior do pólo.

## 5.4 Análise dos dados

### 5.4.1 A deformidade do rotor

A deformidade do rotor será determinada utilizando a modelagem matemática apresentada no item 4.1 do Capítulo 4. Porém, antes de utilizar o código fonte apresentado, deve-se preparar os dados adquiridos de forma a serem compatíveis com o programa.

Primeiramente, determinam-se os parâmetros de referência do gerador 2. O diâmetro do estator do gerador 2 é de aproximadamente 1300 (mm). O entreferro nominal é de aproximadamente 4,8 (mm). Portanto, o diâmetro do rotor será 1290,4 (mm). A Tabela 19 apresenta estas informações.

Tabela 19 – Medidas nominais do gerador 2

<i>Diâmetro do estator (mm)</i>	1300
<i>Entreferro (mm)</i>	4,8
<i>Diâmetro do rotor (mm)</i>	1290,4

O código fonte necessita ainda de um conjunto de medidas, referentes a uma volta completa do rotor. São necessárias somente as medidas referentes aos pólos, descartando as medidas de profundidade existentes entre os pólos. Finalmente, deve existir no conjunto de medidas a repetição da primeira medida, de forma a garantir que uma volta completa do rotor foi realizada. As onze medidas foram retiradas da Figura 65, sendo apresentadas na Tabela 20.

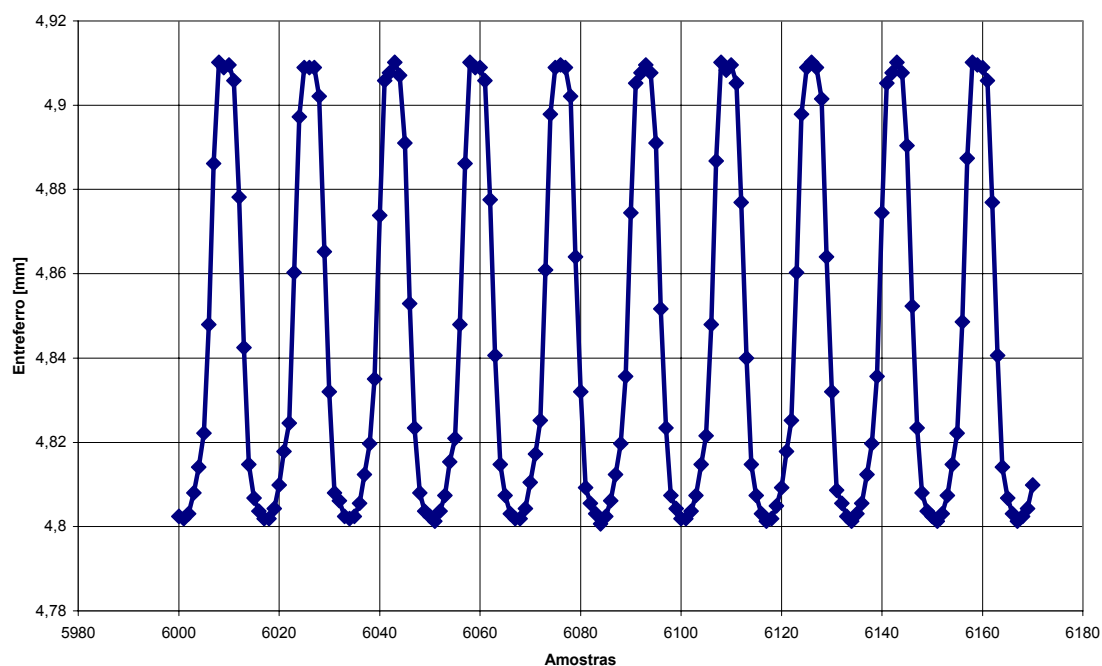


Figura 65 – Apresentação de onze medidas de pólos

Tabela 20 – Medidas do gerador 2

<i>Medida</i>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>7</i>	<i>8</i>	<i>9</i>	<i>10</i>	<i>11</i>
<i>Valor (mm)</i>	4,802	4,802	4,802	4,801	4,802	4,801	4,802	4,801	4,801	4,801	4,802

Com pequenas alterações, o código fonte utilizado está apresentado no Anexo VII. Ao executá-lo, são geradas cinco figuras, sendo as duas últimas as mais importantes, representadas pela Figura 66 e Figura 67.

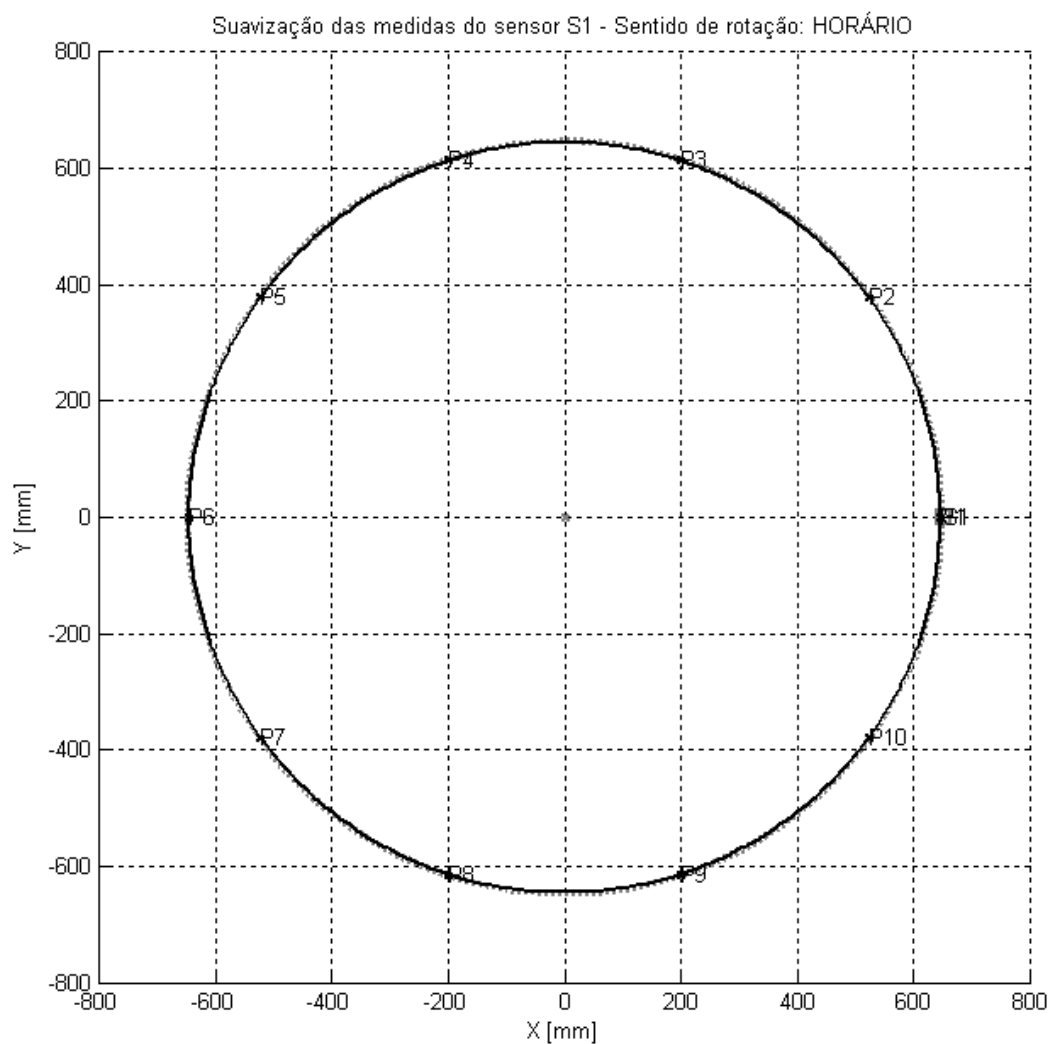


Figura 66 – Deformação do rotor do gerador 2

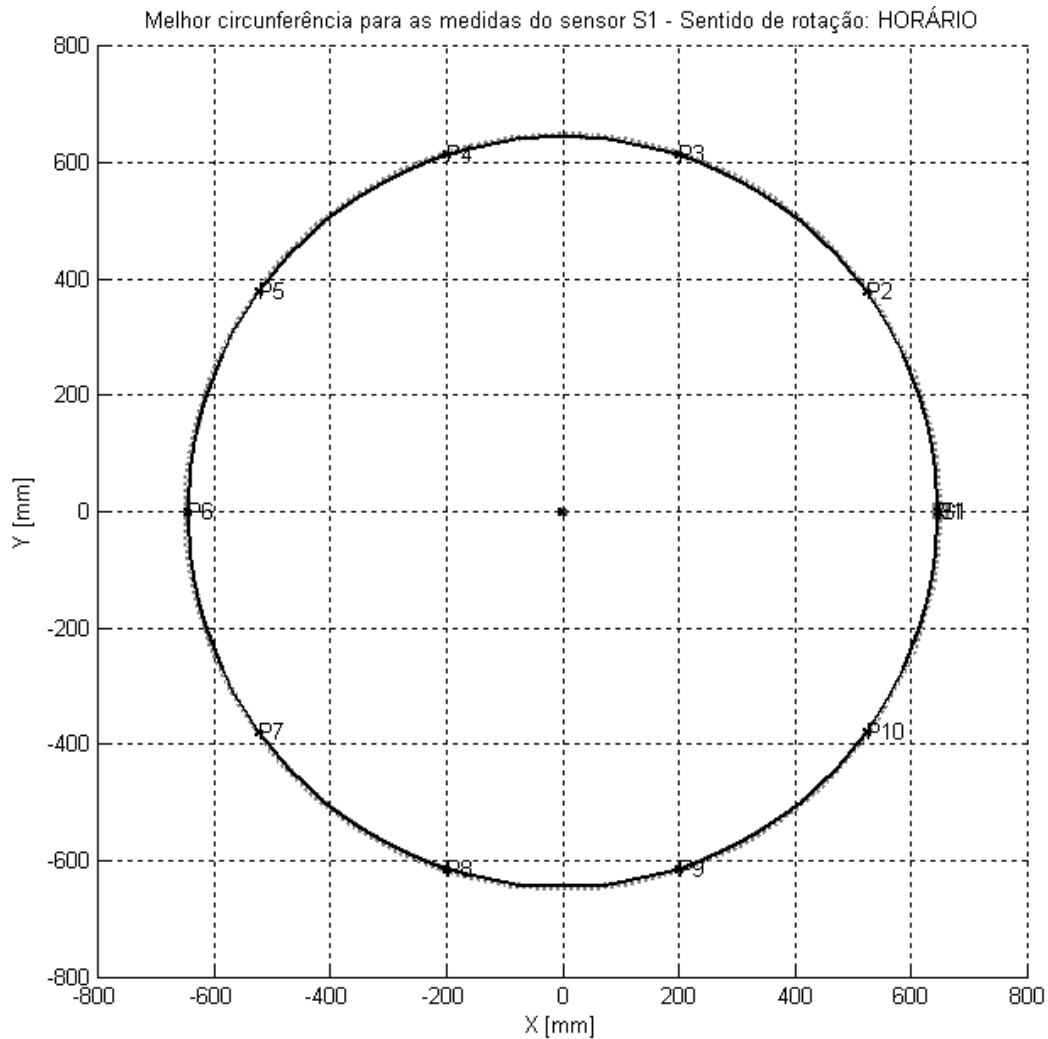


Figura 67 – Melhor circunferência para o rotor do gerador 2

A Tabela 21 apresenta as coordenadas do centro e do raio da melhor circunferência encontrada para o rotor do gerador 2.

Tabela 21 – Propriedades da melhor circunferência do rotor do gerador 2

<i><b>Raio (mm)</b></i>	<i><b>Centro X (mm)</b></i>	<i><b>Centro Y (mm)</b></i>
645,198469	-0,000162	-0,000308

Nota-se que as propriedades calculadas da melhor circunferência são aproximadamente as mesmas da circunferência do rotor do gerador 2. Isto ocorreu devido às pequenas diferenças nos valores aquisitados de cada pólo.

### 5.4.2 Oscilação do entreferro do rotor

O rotor, durante o início da medição, apresentou um entreferro maior do que durante o regime permanente. Pode-se determinar graficamente esta oscilação na medida do entreferro do rotor a partir do início do seu movimento.

Ao utilizar as 100 primeiras amostras, contendo 10 medidas de pólos cada, determina-se graficamente 10 circunferências, apresentadas na Figura 68.

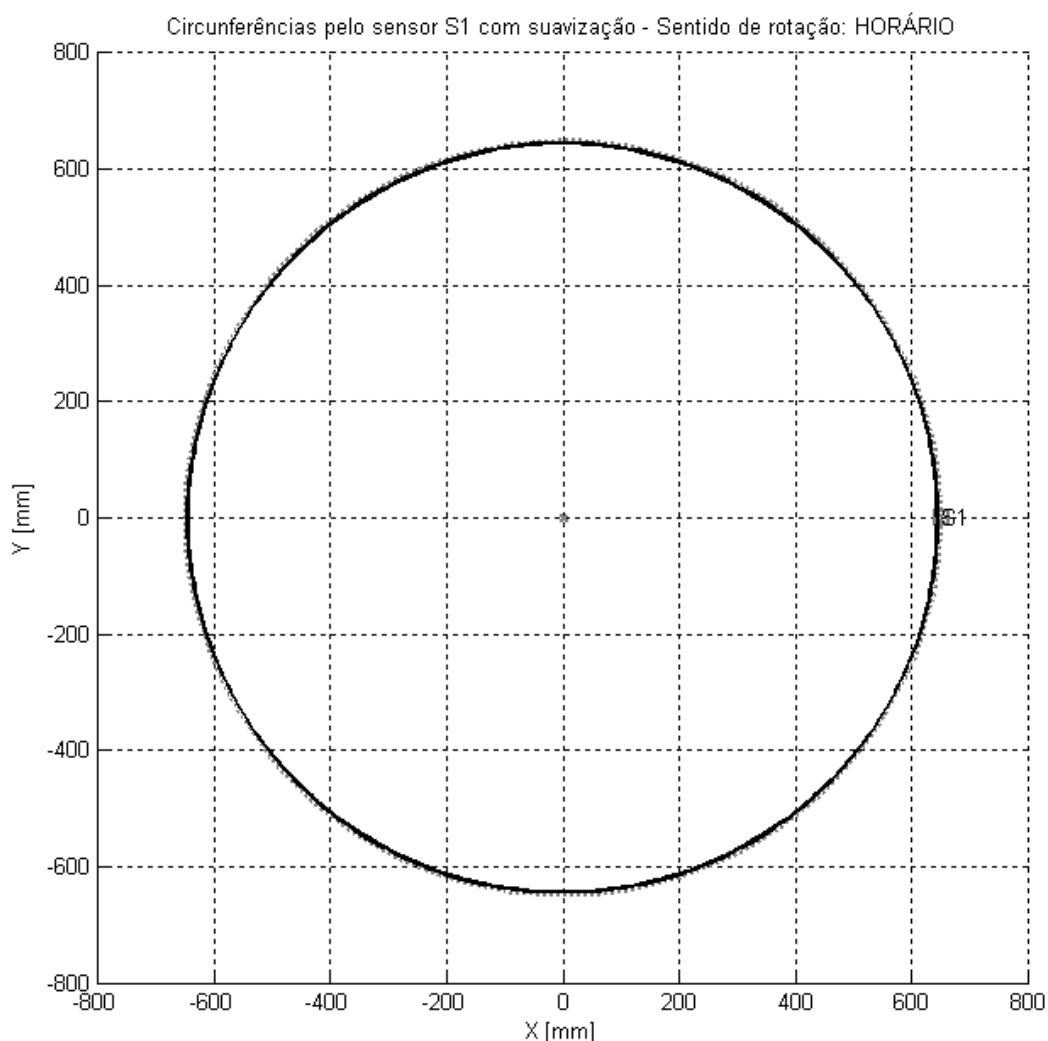


Figura 68 – Circunferências com variação no entreferro do rotor do gerador 2

As oscilações no entreferro são imperceptíveis na Figura 68 pois as dimensões do estator são muito maiores que as medidas do entreferro. Ao ampliar a Figura 68 na região em torno do sensor S1, obtém-se na Figura 69.

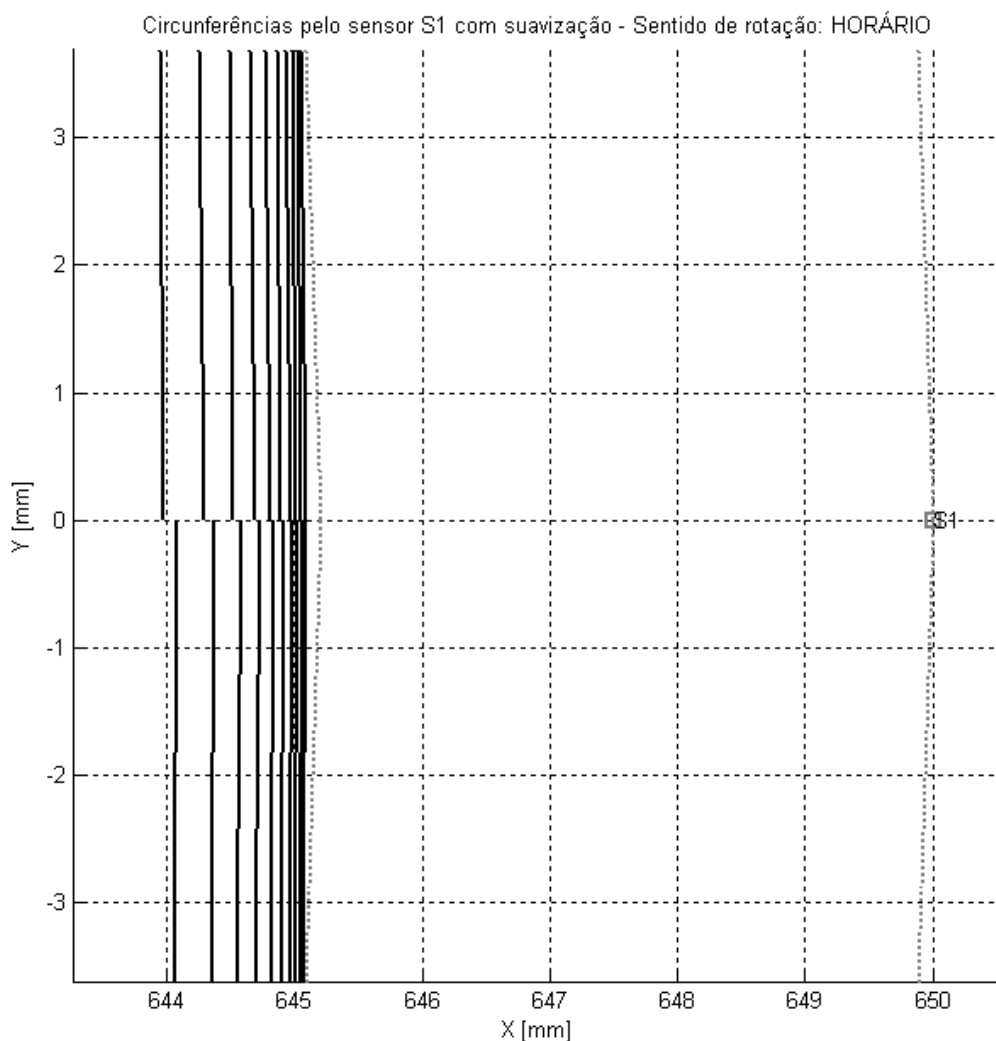


Figura 69 – Ampliação das oscilações do rotor do gerador 2

Como o sentido de rotação é horário, a circunferência é gerada nesse sentido. Assim, o entreferro é inicialmente maior e conforme a circunferência é determinada graficamente, ele decresce. Portanto, o início e o fim da circunferência não se encontram.

Outra maneira de visualizar esta oscilação pode ser feita ao gerar circunferências, sendo que os raios serão as próprias medidas do sensor. A Figura 70 apresenta esta nova visualização, que é bastante simples.



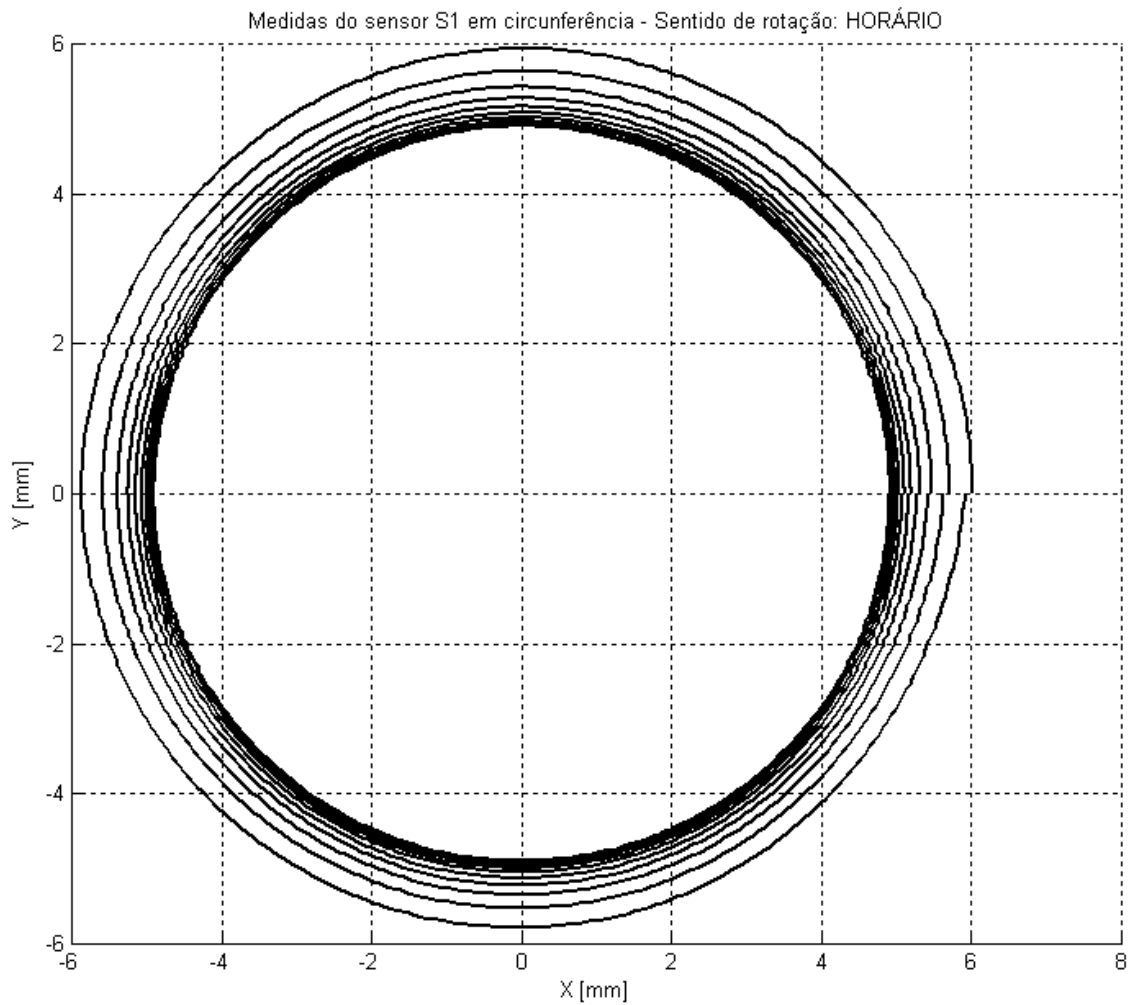


Figura 70 – Outra visualização da oscilação do rotor do gerador 2

O código fonte em MATLAB para a determinação da oscilação do entreferro do rotor encontra-se no Anexo VIII.

## 6 Conclusões e recomendações

Esta dissertação apresentou o desenvolvimento de um sistema para monitoramento contínuo do entreferro de geradores síncronos, compreendendo a concepção e projeto de sensores capacitivos, condicionamento e aquisição de dados, assim como a modelagem e elaboração de rotinas matemáticas para determinação do entreferro, geometria do estator e geometria do rotor.

Os capacitores planos projetados e avaliados neste trabalho apresentaram grande diferença entre o valor projetado desejado e o valor obtido na produção dos capacitores. Ficou evidente que a capacitância entre condutores adjacentes é dependente do dielétrico nas quais as trilhas condutoras estão inseridas. Portanto, para os capacitores planos projetados, que apresentam uma fina espessura de material dielétrico, comprovou-se que ao realizar uma média entre o dielétrico empregado no capacitor e o ar, os valores medidos tornaram-se mais compatíveis com o desejado em projeto. Já os capacitores planos projetados com geometrias em U e em E, apresentaram menor capacitância devido à distribuição da capacitância de dispersão pelas trilhas condutoras, conforme apresentado na Figura 19.

A modelagem matemática apresentada para a análise da deformação do rotor e do estator mostrou-se simples e fácil de ser implementada. Desta forma, pode-se utilizar tanto microcomputadores pessoais quanto sistemas projetados com microcontroladores para que o entreferro seja monitorado on-line.

A apresentação do método para determinação da melhor circunferência para o rotor e estator é eficaz para determinar o centro e o raio da circunferência desejada. Sua formulação matemática é simples e também fácil de ser implementada.

O medidor de capacitância construído utilizando o circuito integrado CAV424 mostrou-se muito eficiente. Devido à técnica da diferença entre sinais, os fatores externos como ruídos e temperatura são eliminados ao se efetuar a diferença. É altamente recomendado neste caso o uso de capacitores que apresente os mesmos coeficientes de variação de temperatura, para que possam ser corrigidos digitalmente através de softwares. Portanto, além de possuírem características semelhantes, é fundamental que o capacitor de referência e o capacitor a ser medido estejam próximos ao circuito integrado e, conseqüentemente, inseridos no mesmo meio.

A instalação dos capacitores planos no gerador 2 da Pequena Central Hidrelétrica Luiz Dias não foi satisfatória, pois não foi possível remover o rotor do gerador 2 para realizar uma fixação mais eficaz dos capacitores. Tal procedimento desbalancearia a máquina, que opera 24 horas ininterruptamente devido a um contrato de geração de energia. Com a má fixação dos capacitores, dois se danificaram, sendo que somente um foi utilizado na medição.

Devido ao problema com os capacitores, foi impossível analisar o estator do gerador 2, uma vez que pelo menos três sensores são necessários para a análise. Com o capacitor remanescente foi possível determinar a geometria do rotor e o comportamento do entreferro em regime dinâmico. Pôde-se então perceber uma diminuição do entreferro dinâmico em relação às suas dimensões em condições estáticas.

Para este sistema de monitoramento on-line, sugerem-se os seguintes trabalhos futuros:

- Análise da contribuição de dois ou mais diferentes meios dielétricos na equação (3.2).
- Implementar o medidor de capacitância com circuito integrado CAV424 em um circuito impresso flexível, de forma que o mesmo circuito apresente o capacitor plano a ser utilizado na medição.
- Realizar a compensação da medida de capacitância em função da variação de temperatura.
- Criar um software executável para o monitoramento on-line do entreferro utilizando a modelagem matemática apresentada.
- Monitorar outras grandezas, como o ângulo de potência e reatâncias síncronas, utilizando o mesmo sensor capacitivo de entreferro desenvolvido neste trabalho.

## Referências Bibliográficas

- AGMS (2002); **Apostila do curso de monitoramento de máquinas AGMS – Air gap monitoring system. 2002.**
- Artioli, M.; Yazidi, A.; Filippetti, F.; Capolino, G.A. (2004); **A general purpose software for signal processing oriented to the diagnosis of electrical machines.** International Symposium on Industrial Electronics 2004 IEEE. Volume 2, 4-7 May 2004 Page(s): 809 - 814.
- ASI Instruments (2005); Lista com constantes dielétricas de vários materiais. Disponível em <<http://www.asiinstr.com/technical/Dielectric%20Constants.htm>>. Acesso em 23 de fevereiro de 2005.
- Bortoni, E.C. (2005); **Apostila de instrumentação industrial.** Instituto de Sistemas Elétricos e Energia – Universidade Federal de Itajubá
- Chernov, N.; Lesort, C (2005). **Least squares fitting of circles and lines.** Department of Mathematics – University of Alabama at Birmingham, 2005.
- Churchill, T.L.; Edmonds, J.S.; Burns, C.W. (1991); **Rotor-mounted scanning of stators in hydro and turbine-drive generators.** Proceedings of the 20th Electrical Electronics Insulation Conference. Boston '91 EEIC/ICWA Exposition. 7-10 Oct. 1991 Page(s): 38 – 46.
- Cirvale (2005). Informações sobre a fabricação de circuitos impressos rígidos. <<http://www.cirvale.com.br>>. Acesso em 16 de maio de 2005.
- Condugraf (2005). Fabricante de circuitos impressos flexíveis. <<http://www.condugraf.com.br>>. Acesso em 16 de maio de 2005.
- Coombs, Clyde F (1979). **Printed Circuits Handbook Second Edition.** McGraw-Hill.
- Despalatovic, M.; Jadric, M.; Terzic, B.; Macan (2004), J. **On-line Hydrogenerator Power Angle and Synchronous Reactances Determination Based on Air Gap Measurement.** Power Systems Conference and Exposition. IEEE PES 10-13 Oct. 2004 Page(s): 753 - 758 vol.2.
- Drumm, M.; Hause, W.C. (2000); **High performance rotor monitoring.** Digital Avionics Systems Conferences. Proceedings. DASC. The 19th. Volume 2, 7-13 Oct. 2000 Page(s): 6E4/1 - 6E4/8 vol.2.

- Fischer, R. (2002); **Digital Correction of Capacitive Signals**. Sensors Magazine Online, Abril de 2002. <<http://www.sensormag.com/articles/0402/capacitive>> Acesso em Abril de 2004.
- Fortin, T.; Duffeau, F. (1997); **Large generator vibration monitoring**. Eighth International Conference on Electrical Machines and Drives (Conf. Publ. No. 444) 1-3 Sept. 1997 Page(s): 155 – 159.
- Gelle, G.; Colas, M.; Serviere, C. (2003); **Blind source separation: a new pre-processing tool for rotating machines monitoring?** IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. Volume 52, Issue 3, June 2003 Page(s): 790 – 795.
- Godim, T. (2006); Interpolação spline e seus fundamentos <<http://www.ic.uff.br/~aconci/splineatual.html>>. Acesso em 2 de fevereiro de 2006.
- Gross, D.W. (2002); **Partial discharge measurement and monitoring on rotating machines**. IEEE International Symposium on Electrical Insulation, 2002. Conference Record of the 2002. 7-10 April 2002 Page(s): 570 – 574.
- Haskew, T.A.; Schinstock, D.E.; Bredeson, J.G.; Salem, T.E. (1996); **Brushless machine monitoring and simulation**. Energy Conversion Engineering Conference, 1996. IECEC 96. Proceedings of the 31st Intersociety. Volume 1, 11-16 Aug. 1996 Page(s): 203 - 208.
- Hwang, D.; Lee, K.C.; Kim, Y.J.; Choi, K.H.; Kim, M.H.; Lee, J.H. (2005); **A study on dynamic simulation and detection of air-gap eccentricity in induction machines**. Industrial Electronics. ISIE 2005. International Symposium on Proceedings of the IEEE. Volume 2, 20-23 June 2005 Page(s): 867 – 870.
- Hyperphysics (2005). Universidade do Estado da Geórgia – EUA. <<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/hframe.html>>. Acesso em 16 de maio de 2005.
- Interactive Mathematics (2006). Fundamentos matemáticos. <[http://www.intmath.com/PlnAnalGeom/6\\_PolC.php](http://www.intmath.com/PlnAnalGeom/6_PolC.php)>. Acesso em 2 de fevereiro de 2006.
- IPC – Association Connecting Electronics Industries (2005). Apresenta padrões para medições a serem realizadas em placas de circuito impresso. <<http://www.ipc.org/contentpage.asp?PageID=4.1.0.1.1>>. Acesso em 23 de fevereiro de 2005.
- Joksimovic, G.M. (2005); **Dynamic simulation of cage induction machine with air gap eccentricity**. IEEE Proceedings on Electric Power Applications. Volume 152, Issue 4, 8 July 2005 Page(s): 803 – 811.

- Laggan, P.A. (1999); **Vibration monitoring**. IEEE Colloquium on Understanding your Condition Monitoring (Ref. No.1999/117). 22 April 1999 Page(s): 3/1 – 311.
- Lennon, C.A., Jr. (1990); **Improved generator temperature monitoring for hydroelectric power plants**. IEEE Transactions on Energy Conversion. Volume 5, Issue 2, June 1990 Page(s): 259 – 264.
- Lloyd, B.A.; Campbell, S.R.; Stone, G.C. (1999); **Continuous on-line partial discharge monitoring of generator stator windings**. IEEE Transactions on Energy Conversion. Volume 14, Issue 4, Dec. 1999 Page(s): 1131 – 1138.
- Lopez-Hignera, J.-M.; Morante, M.A.; Cobo, A. (1997); **Simple low-frequency optical fiber accelerometer with large rotating machine monitoring applications**. Journal of Lightwave Technology. Volume 15, Issue 7, July 1997 Page(s): 1120 – 1130.
- Mahalungkar, S.; Ingram, M. (2004); **Online and manual (offline) vibration monitoring of equipment for reliability centered maintenance**. Cement Industry Technical Conference, 2004. IEEE-IAS/PCA 25-30 April 2004 Page(s): 245 – 261.
- Maisonobe, L. (2005) **Finding the circle that best fits a set of points**. Publicado no site Space roots. <<http://www.spaceroots.org>>. Acesso em 10 de novembro de 2005.
- Metzker, Raimundo J. I.; Bissonnette, Marc. R.; Tréteault, André; Lin, Jackson (1999). **UHE Igarapava – Como o monitoramento do entreferro evitou danos de grande monta no gerador**. CEMIG.
- Mohammed, O.A.; Liu, S.; Abed, N. (2004); **Study of the Inverse Magnetostriction Effect on Machine Deformation**. IEEE Proceedings. SoutheastCon, 2004. 26-29 Mar 2004 Page(s): 433 – 436.
- PCB-Shop (2005). Informações sobre fabricação de circuitos impressos. <[http://www.hta-bi.bfh.ch/E/ecad/PCBShop/routepcb/standards\\_N.htm](http://www.hta-bi.bfh.ch/E/ecad/PCBShop/routepcb/standards_N.htm)>. Acesso em 16 de maio de 2005.
- Pollock, G.B.; Lyles, J.F. (1992); **Vertical hydraulic generators experience with dynamic air gap monitoring**. IEEE Transactions on Energy Conversion. Volume 7, Issue 4, Dec. 1992 Page(s): 660 – 668.
- Sang-Bin Lee; Habetler, T.G.; Harley, R.G.; Gritter, D.J. (2002); **An evaluation of model-based stator resistance estimation for induction motor stator**

- winding temperature monitoring.** IEEE Transactions on Energy Conversion. Volume 17, Issue 1, March 2002 Page(s): 7 – 15.
- Smith, R. (1999); **Monitoring for rotor shorted turns.** IEEE Colloquium on Understanding your Condition Monitoring (Ref. No.1999/117). 22 April 1999 Page(s): 8/1 – 820.
- Stone, G.C. (1999); **Overview of hydrogenerator stator winding monitoring.** Electric Machines and Drives. International Conference IEMD '99 9-12 May 1999 Page(s): 806 – 808.
- Tansel, I.N.; Singh, R.; Peng Chen; Xiaoyu Wang; Bao, W.; Dede, C.; Tosunoglu, S.; Inanc, F.; Kropas-Hughes, C. (2004); **Monitoring and management of machines with wireless PDAs in wireless networked facilities.** Mechatronics. ICM '04. International Conference on Proceedings of the IEEE. 3-5 June 2004 Page(s): 536 – 541.
- Tetrault, S.M.; Stone, G.C.; Sedding, H.G.; **Monitoring partial discharges on 4-kV motor windings.** IEEE Transactions on Industry Applications. Volume 35, Issue 3, May-June 1999 Page(s): 682 – 688.
- Tiwari, A.; Lewis, F.L.; Ge, S.S. (2004); **Wireless sensor network for machine condition based maintenance.** Control, Automation, Robotics and Vision Conference. ICARCV 2004 8th. Volume 1, 6-9 Dec. 2004 Page(s): 461 – 467.
- Toliyat, H.A.; Al-Nuaim, N.A. (1999); **Simulation and detection of dynamic air-gap eccentricity in salient-pole synchronous machines.** IEEE Transactions on Industry Applications. Volume 35, Issue 1, Jan.-Feb. 1999 Page(s): 86 – 93.
- Umbach, D.; Jones, K. N (2003). **A Few Methods for Fitting Circles to Data.** IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, Vol. 52, No. 6, Dezembro de 2003.
- Wieser, R.S.; Kral, C.; Pirker, F. (1998); **The Vienna induction machine monitoring method; on the impact of the field oriented control structure on real operational behavior of a faulty machine.** Industrial Electronics Society. IECON '98. Proceedings of the 24th Annual Conference of the IEEE. Volume 3, 31 Aug.-4 Sept. 1998 Page(s): 1544 - 1549 vol.3.
- Zangl, H.; Bretterkieber, T. (2004); **Rotor design for capacitive sensors.** Sensors. Proceedings of IEEE. 24-27 Oct. 2004 Page(s): 520 - 523 vol.1.

## Anexos



# Anexo I – Capacitores projetados

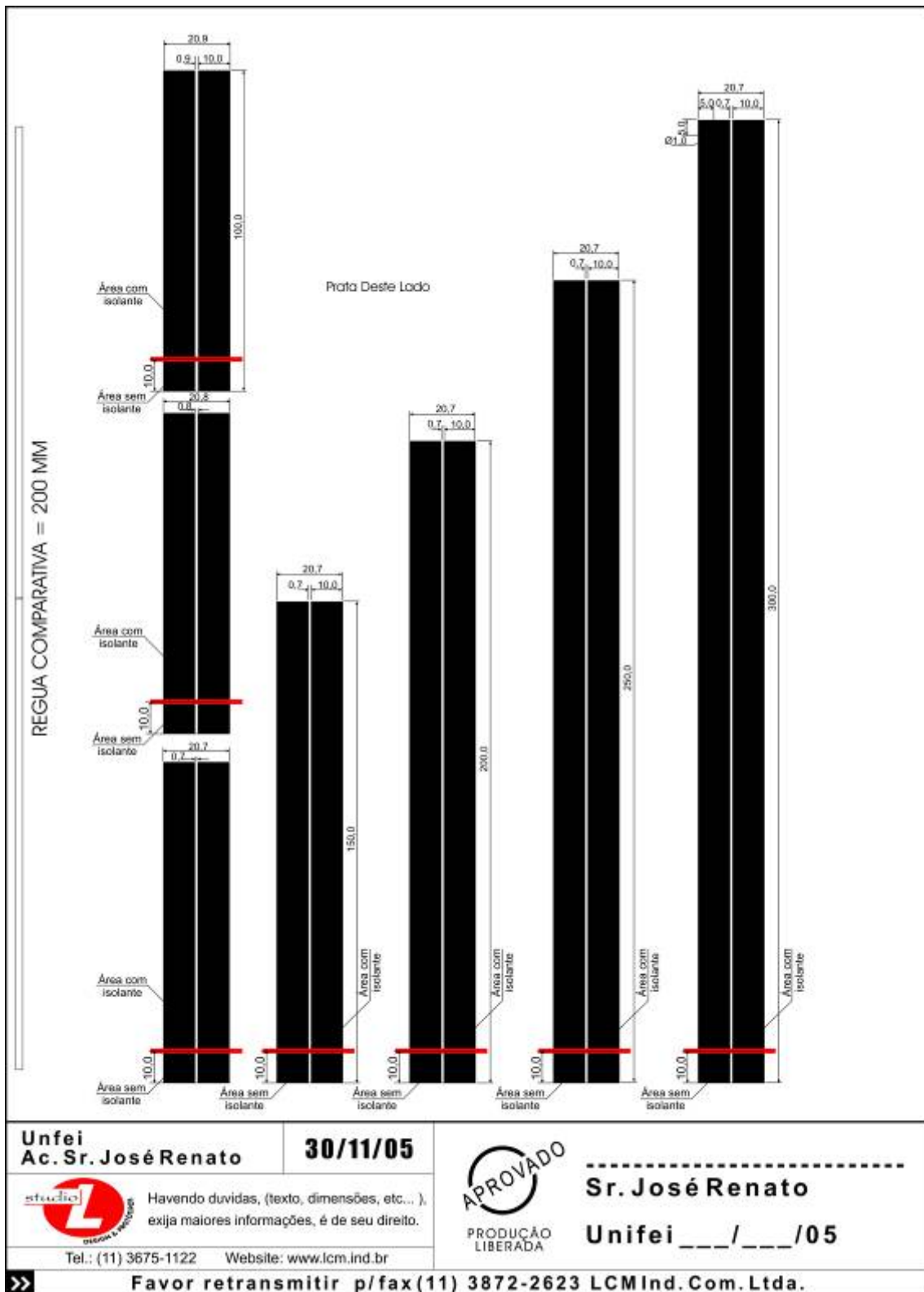


Figura 71 – Capacitores com trilhas condutoras de 10 (mm) de largura

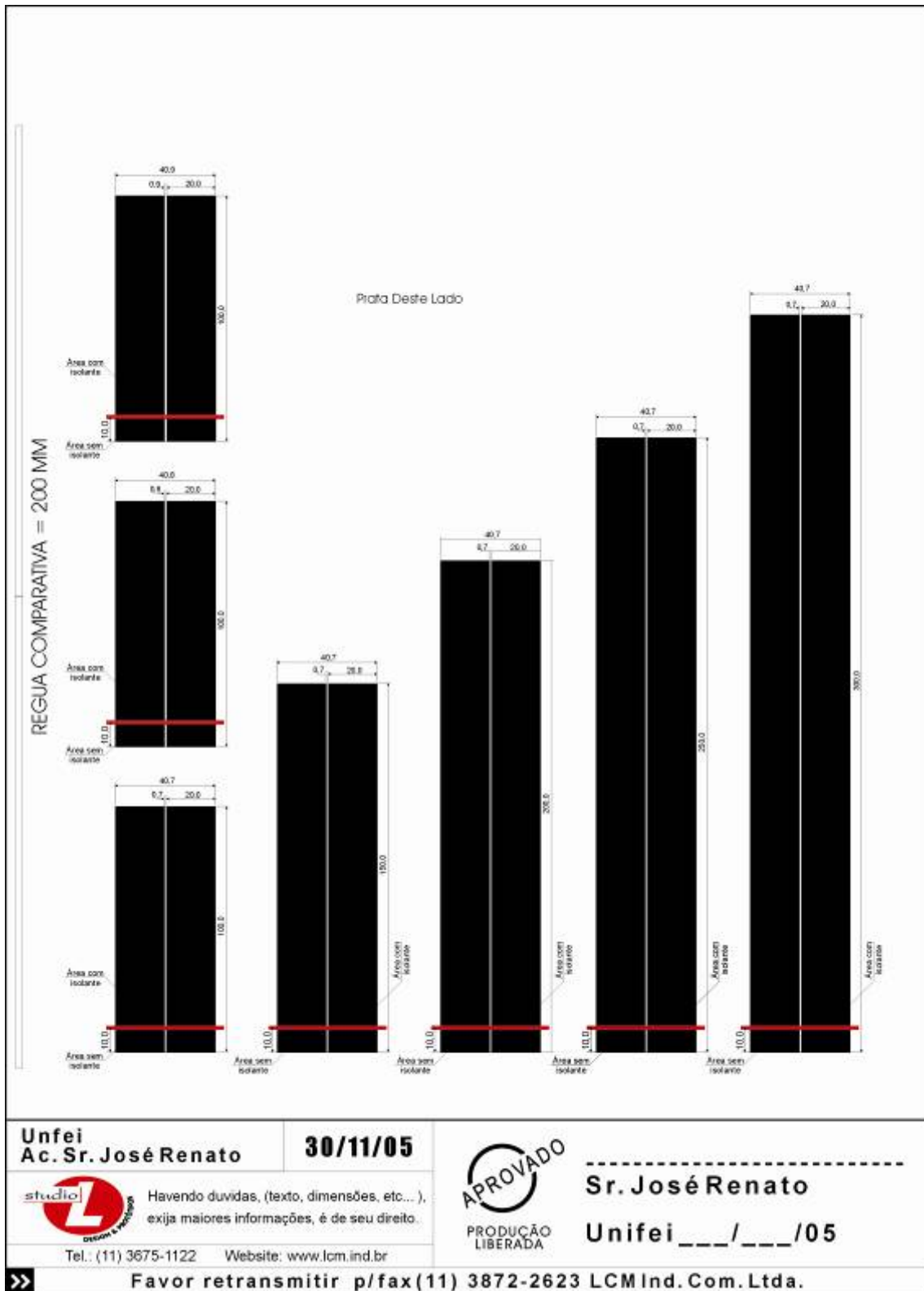


Figura 72 – Capacitores com trilhas condutoras de 20 (mm) de largura

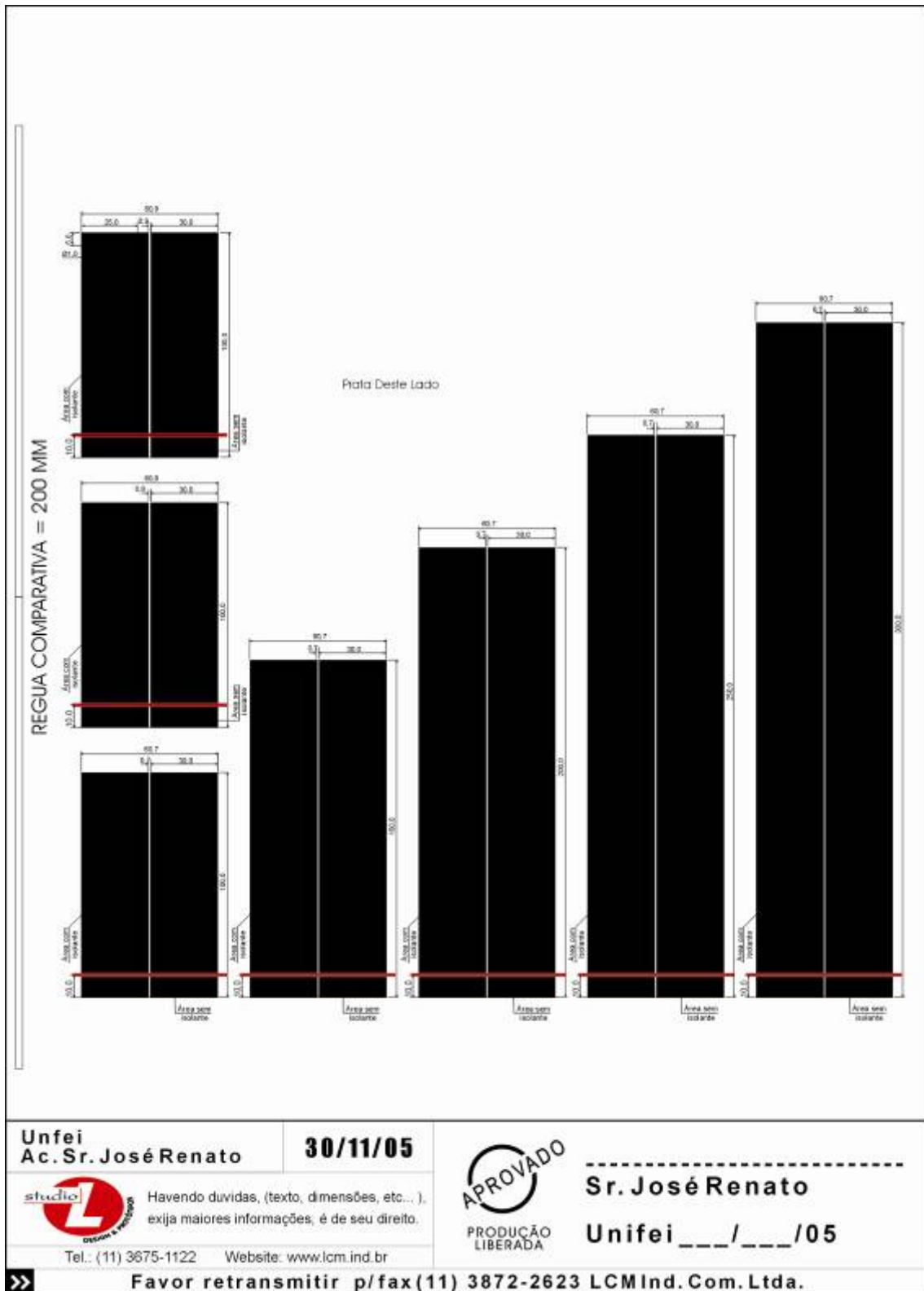


Figura 73 – Capacitores com trilhas condutoras de 30 (mm) de largura

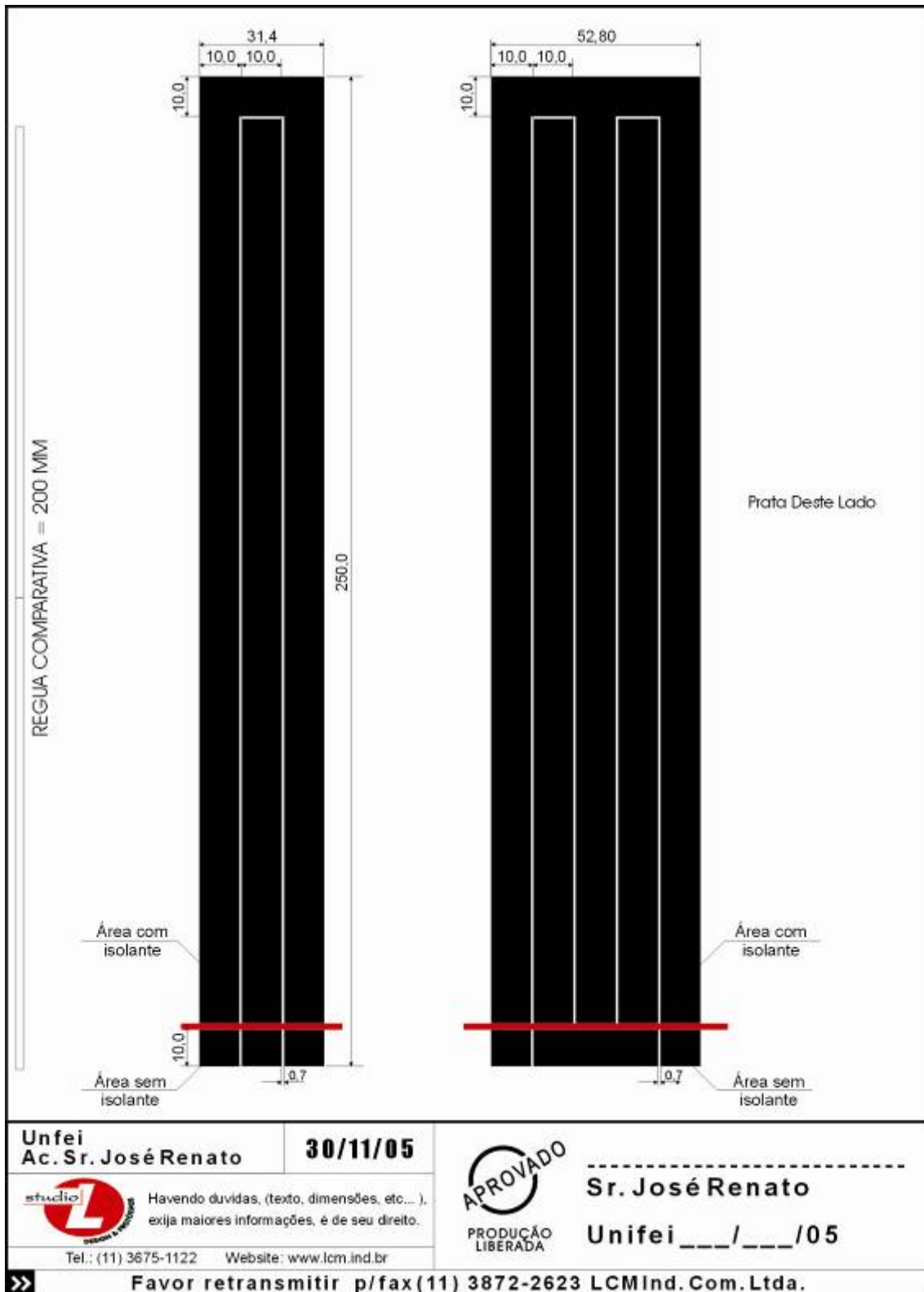


Figura 74 – Capacitores com trilhas condutoras de 10 (mm) de largura, com *layout* em

U e E

## Anexo II – Medidas por rampa de subida

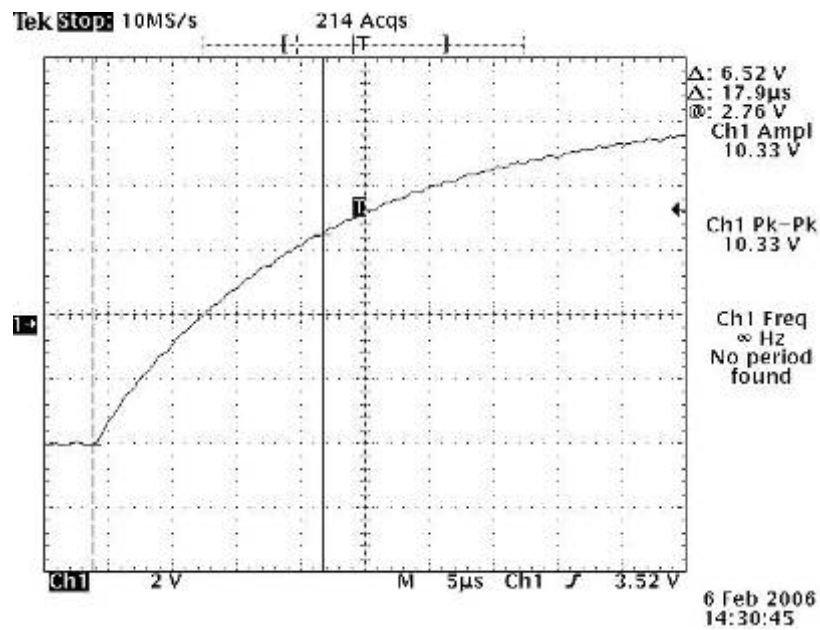


Figura 75 – Rampa de subida para o capacitor de 10 (mm) de largura por 100 (mm) de comprimento e espaçamento de 0,7 (mm)

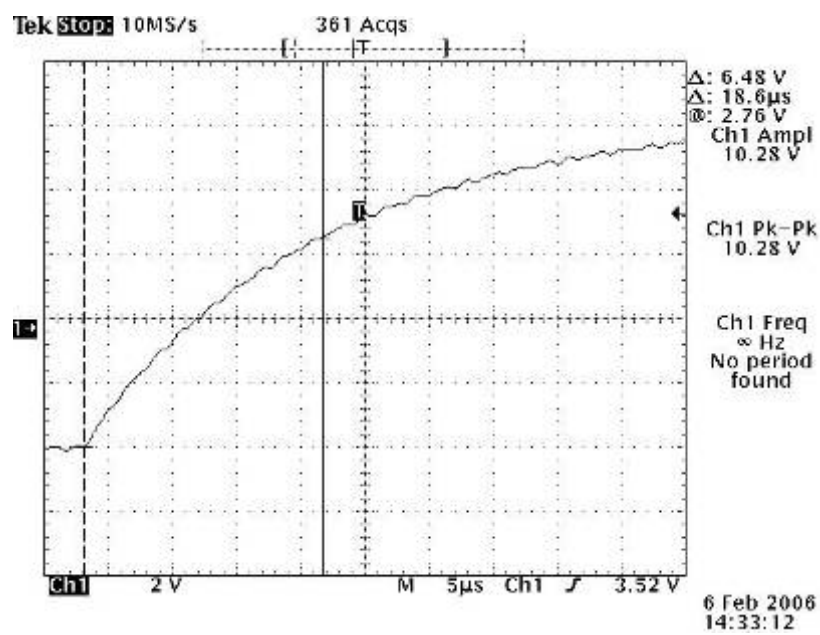


Figura 76 – Rampa de subida para o capacitor de 10 (mm) de largura por 100 (mm) de comprimento e espaçamento de 0,8 (mm)

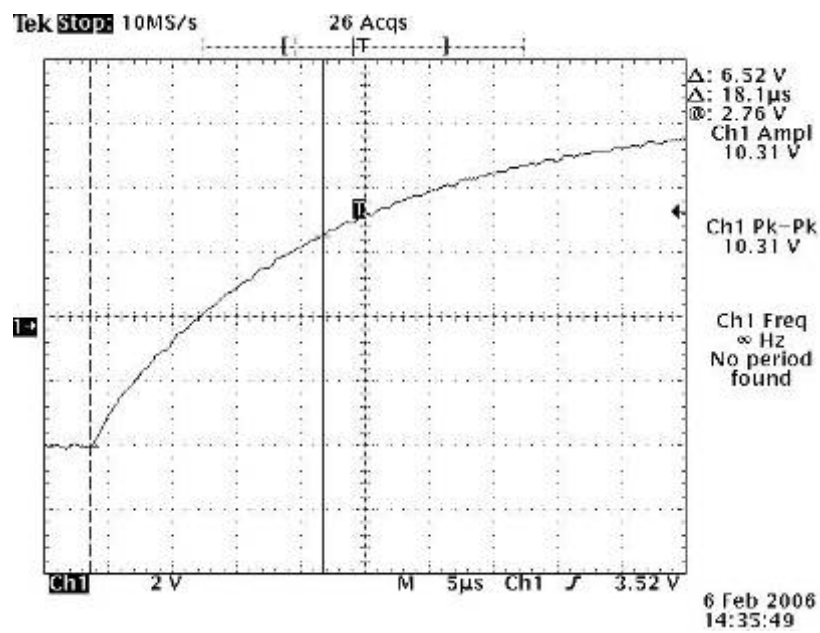


Figura 77 – Rampa de subida para o capacitor de 10 (mm) de largura por 100 (mm) de comprimento e espaçamento de 0,9 (mm)

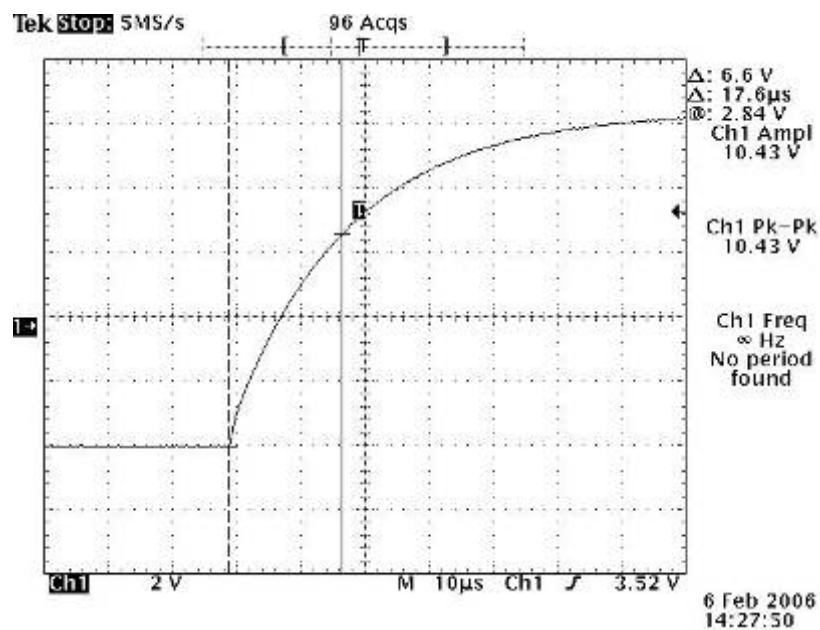


Figura 78 – Rampa de subida para o capacitor de 10 (mm) de largura por 150 (mm) de comprimento e espaçamento de 0,7 (mm)

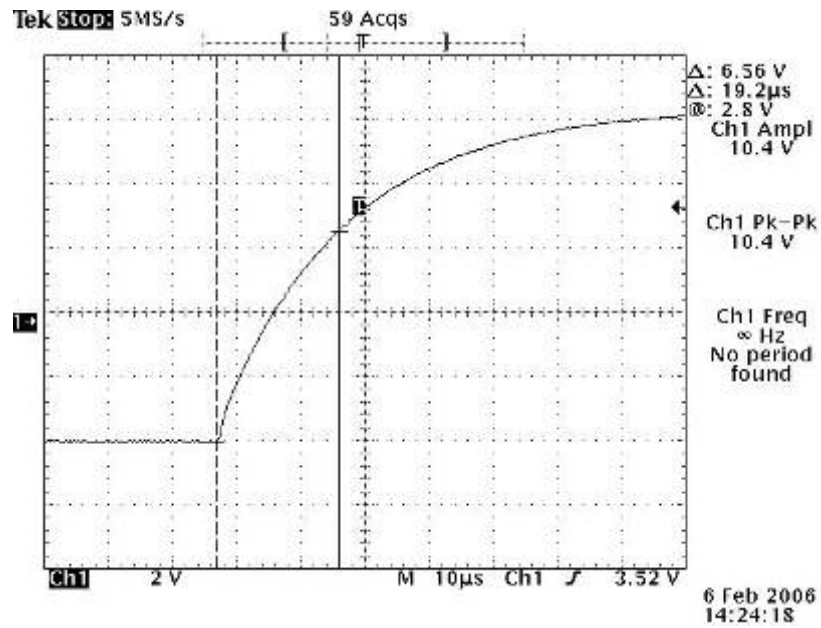


Figura 79 – Rampa de subida para o capacitor de 10 (mm) de largura por 200 (mm) de comprimento e espaçamento de 0,7 (mm)

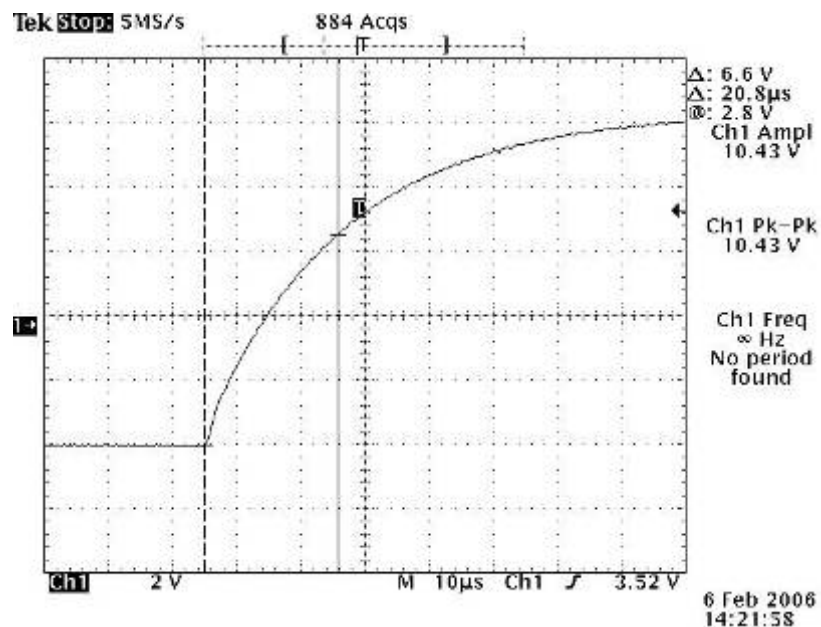


Figura 80 – Rampa de subida para o capacitor de 10 (mm) de largura por 250 (mm) de comprimento e espaçamento de 0,7 (mm)

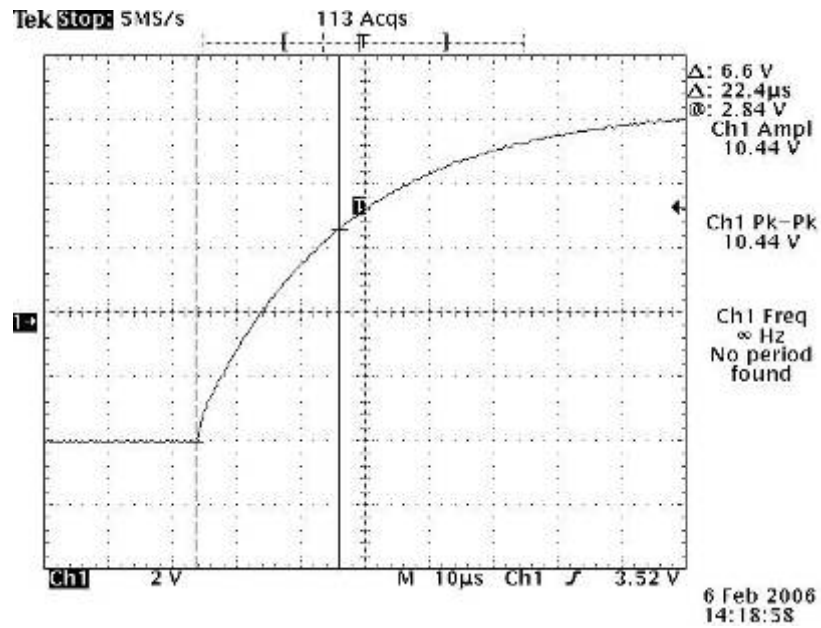


Figura 81 – Rampa de subida para o capacitor de 10 (mm) de largura por 300 (mm) de comprimento e espaçamento de 0,7 (mm)

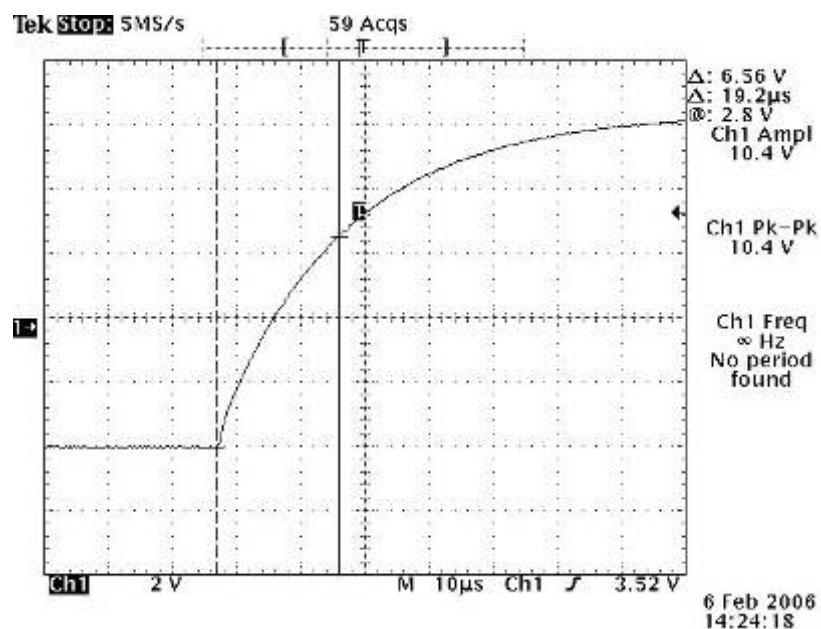


Figura 82 – Rampa de subida para o capacitor de 20 (mm) de largura por 100 (mm) de comprimento e espaçamento de 0,7 (mm)



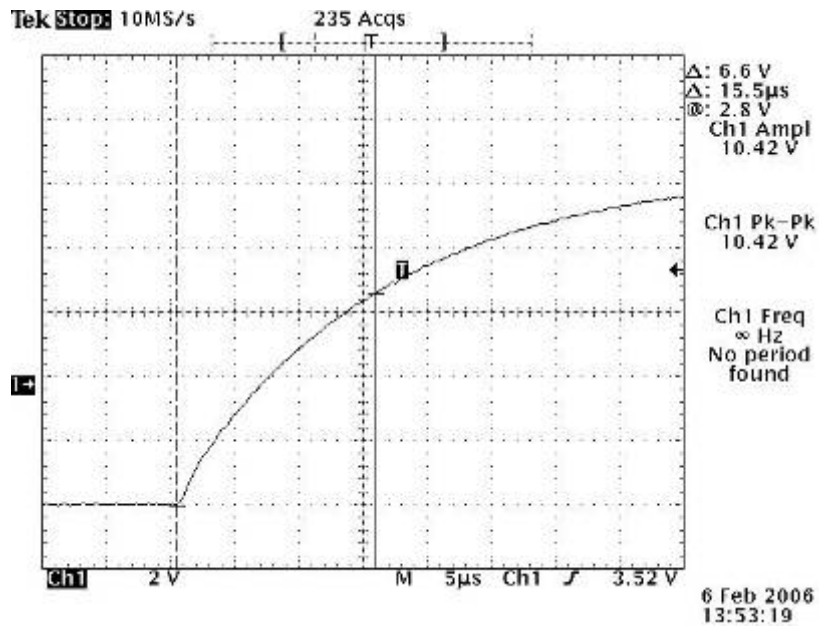


Figura 83 – Rampa de subida para o capacitor de 20 (mm) de largura por 100 (mm) de comprimento e espaçamento de 0,8 (mm)

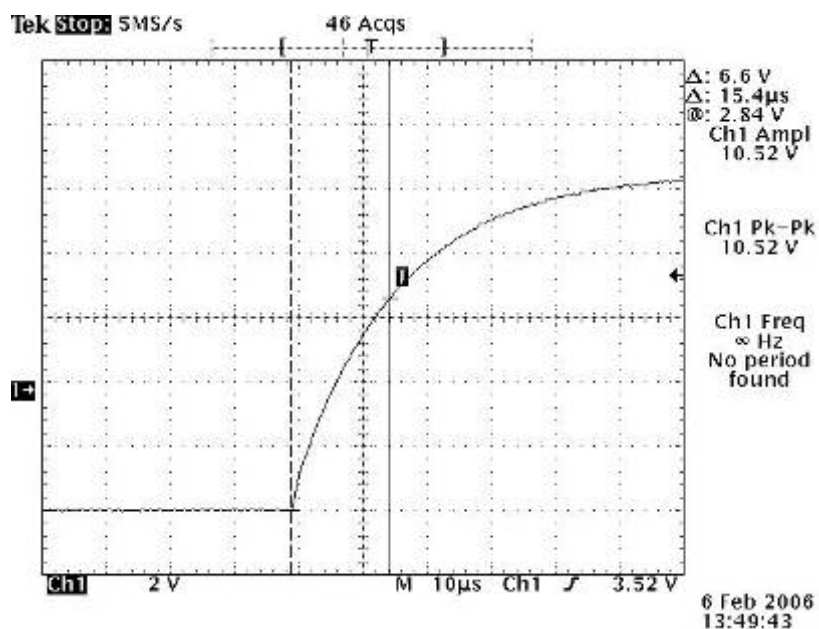


Figura 84 – Rampa de subida para o capacitor de 20 (mm) de largura por 100 (mm) de comprimento e espaçamento de 0,9 (mm)

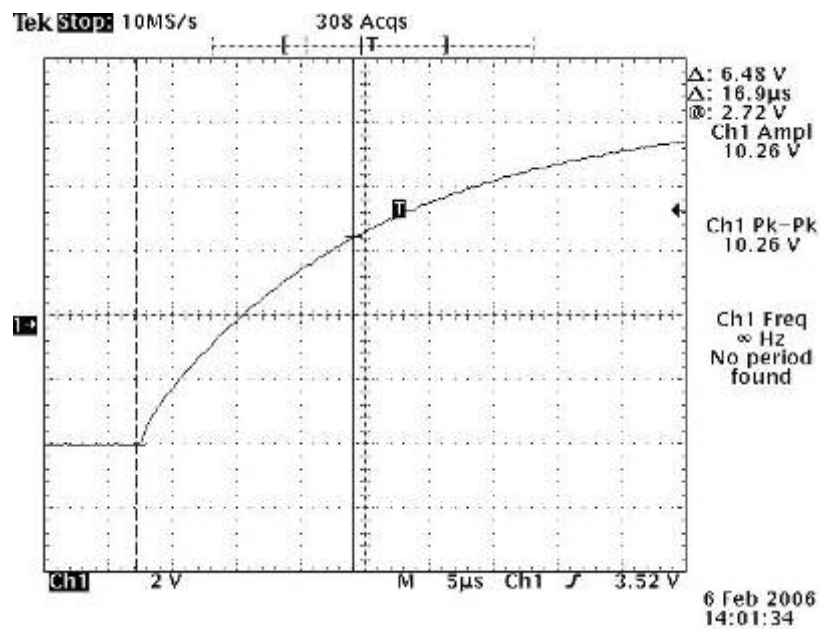


Figura 85 – Rampa de subida para o capacitor de 20 (mm) de largura por 150 (mm) de comprimento e espaçamento de 0,7 (mm)

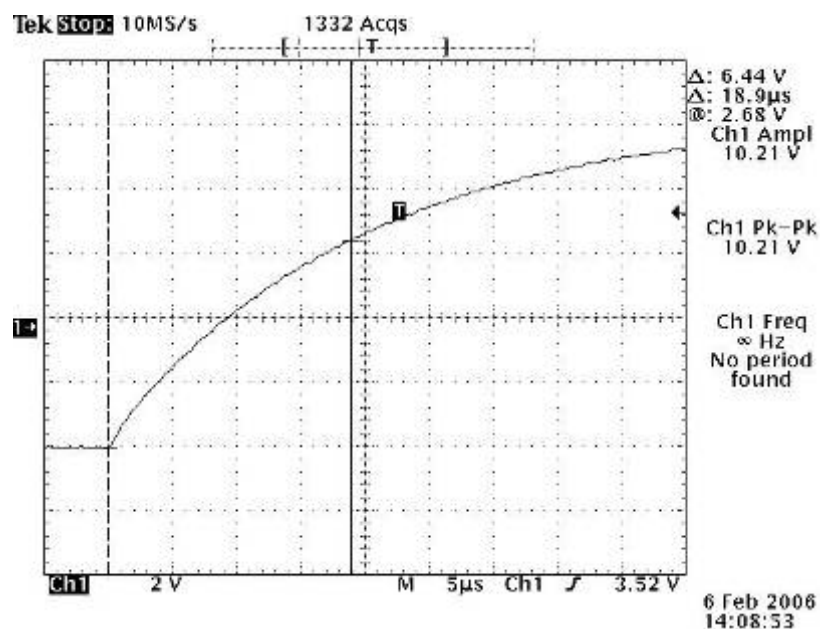


Figura 86 – Rampa de subida para o capacitor de 20 (mm) de largura por 200 (mm) de comprimento e espaçamento de 0,7 (mm)

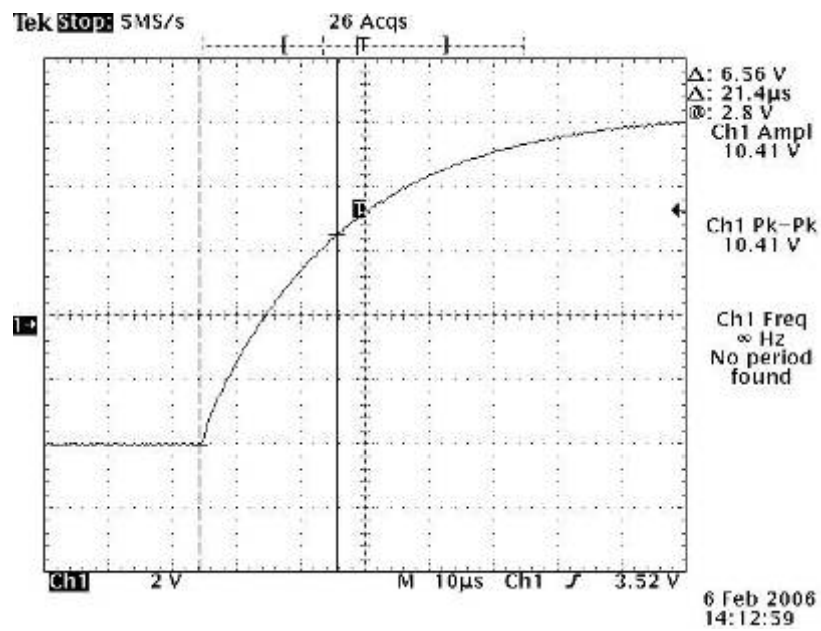


Figura 87 – Rampa de subida para o capacitor de 20 (mm) de largura por 250 (mm) de comprimento e espaçamento de 0,7 (mm)

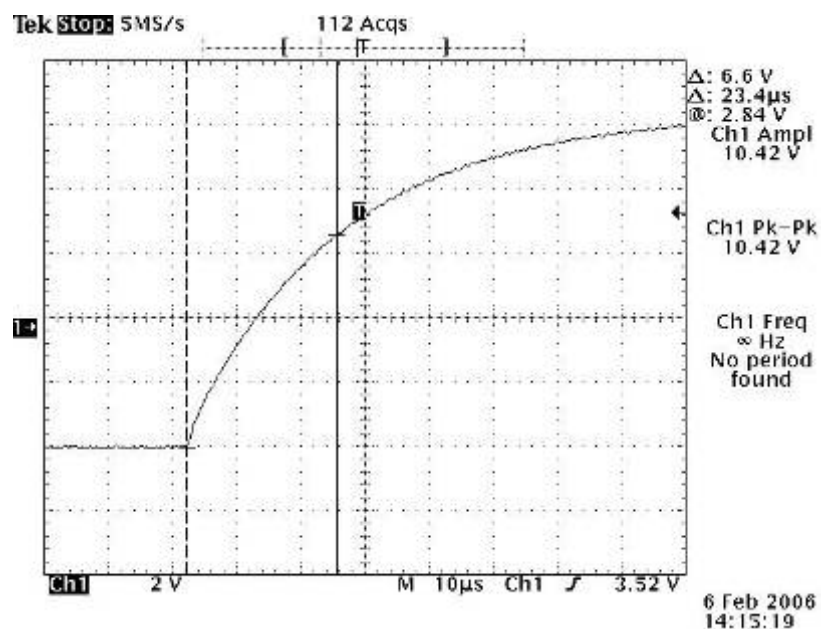


Figura 88 – Rampa de subida para o capacitor de 20 (mm) de largura por 300 (mm) de comprimento e espaçamento de 0,7 (mm)

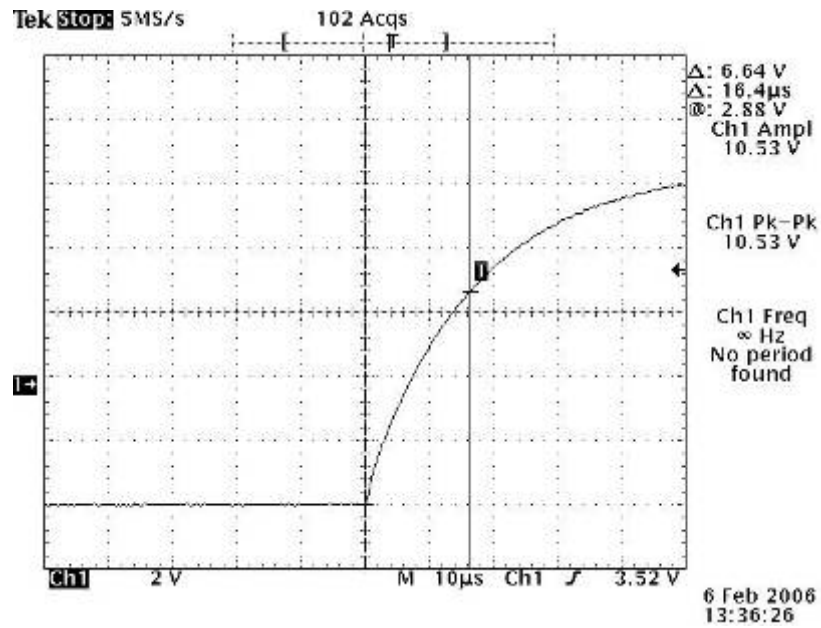


Figura 89 – Rampa de subida para o capacitor de 30 (mm) de largura por 100 (mm) de comprimento e espaçamento de 0,7 (mm)

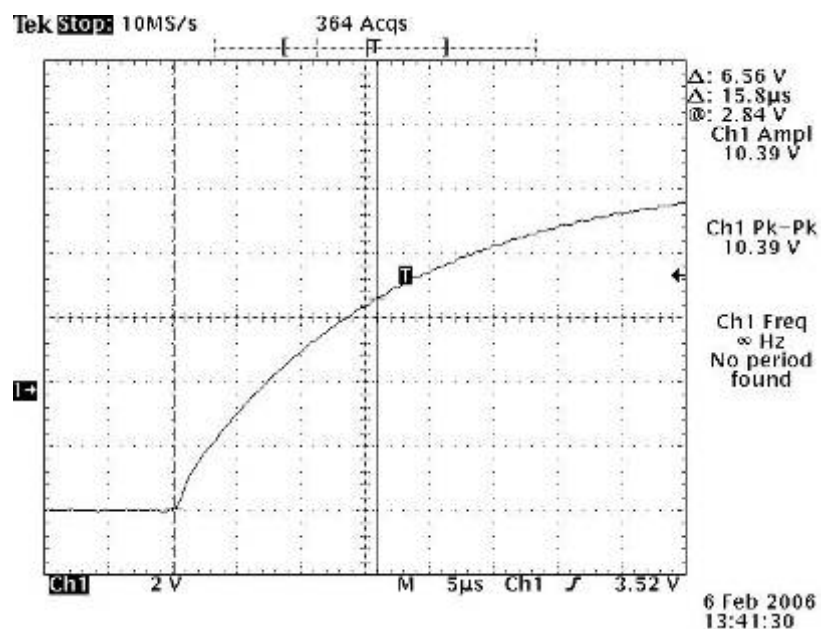


Figura 90 – Rampa de subida para o capacitor de 30 (mm) de largura por 100 (mm) de comprimento e espaçamento de 0,8 (mm)

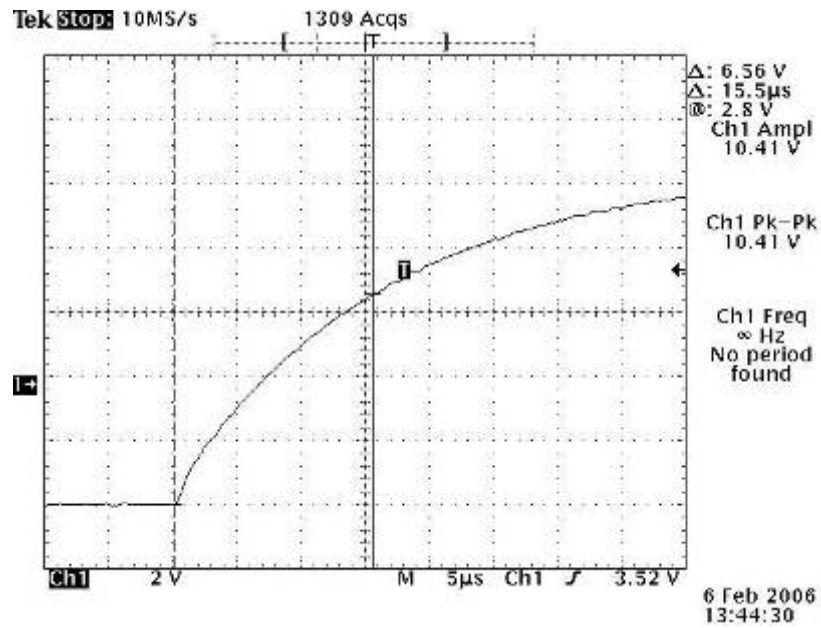


Figura 91 – Rampa de subida para o capacitor de 30 (mm) de largura por 100 (mm) de comprimento e espaçamento de 0,9 (mm)

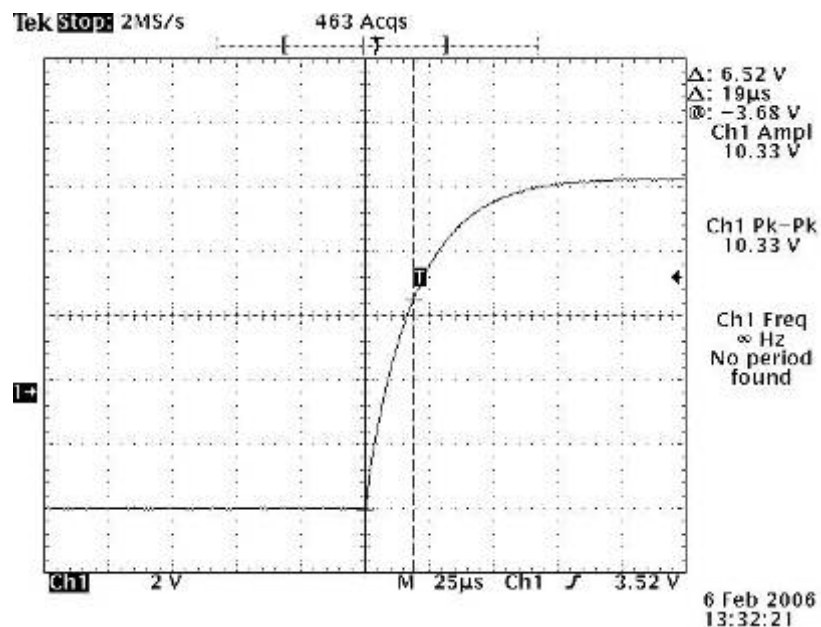


Figura 92 – Rampa de subida para o capacitor de 30 (mm) de largura por 150 (mm) de comprimento e espaçamento de 0,7 (mm)

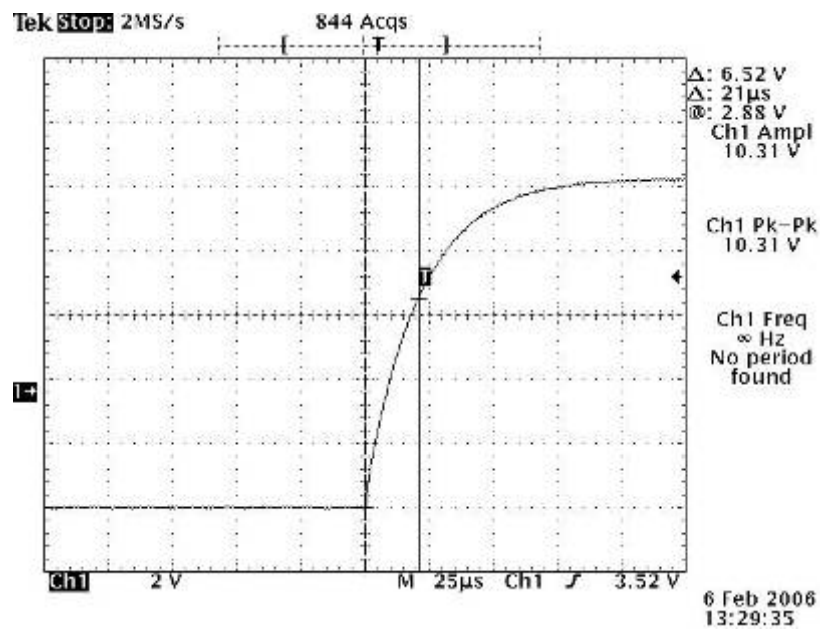


Figura 93 – Rampa de subida para o capacitor de 30 (mm) de largura por 200 (mm) de comprimento e espaçamento de 0,7 (mm)

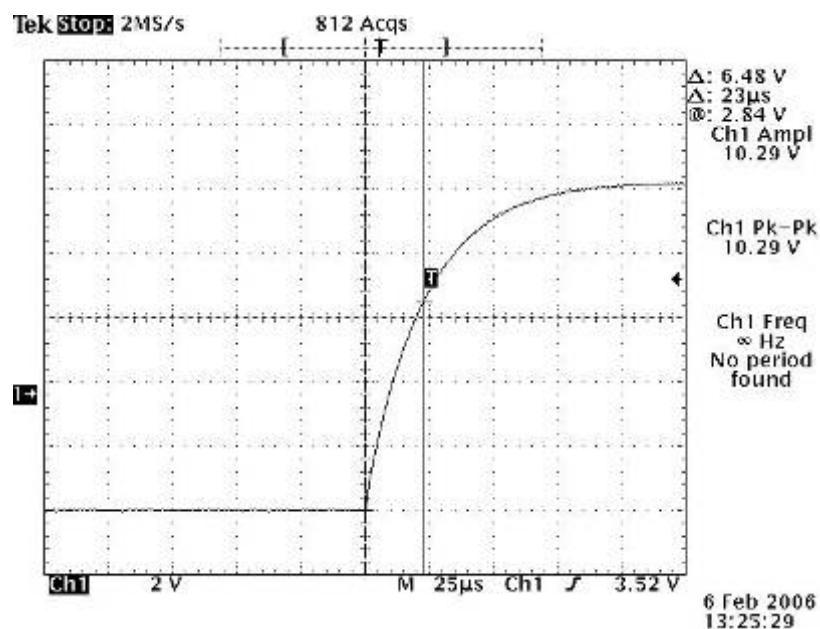


Figura 94 – Rampa de subida para o capacitor de 30 (mm) de largura por 250 (mm) de comprimento e espaçamento de 0,7 (mm)

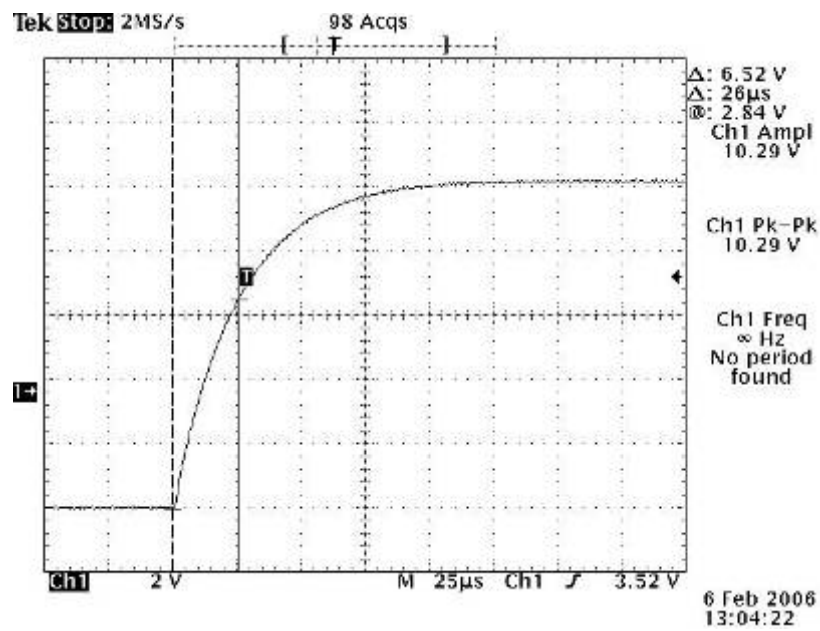


Figura 95 – Rampa de subida para o capacitor de 30 (mm) de largura por 300 (mm) de comprimento e espaçamento de 0,7 (mm)

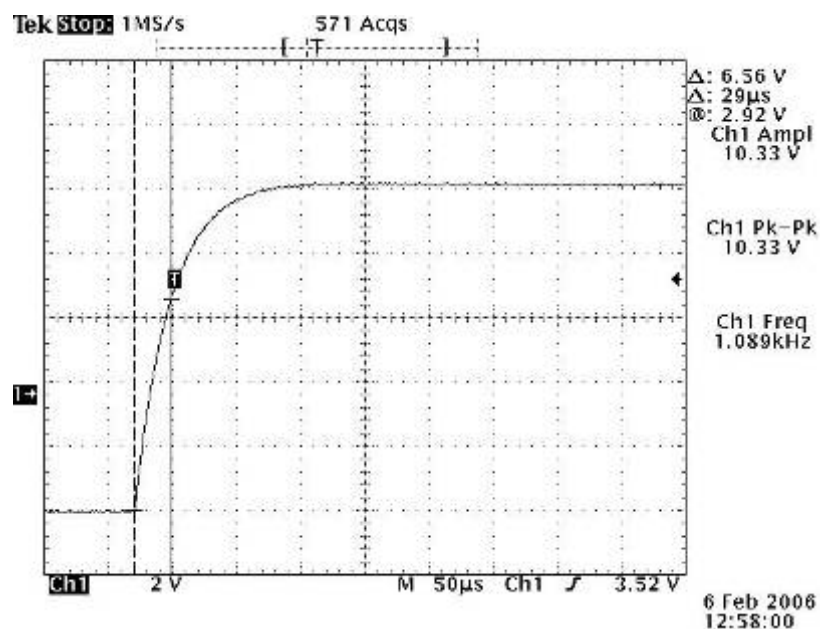


Figura 96 – Rampa de subida para o capacitor de 10 (mm) de largura por 250 (mm) de comprimento, espaçamento de 0,7 (mm) e *layout* em U

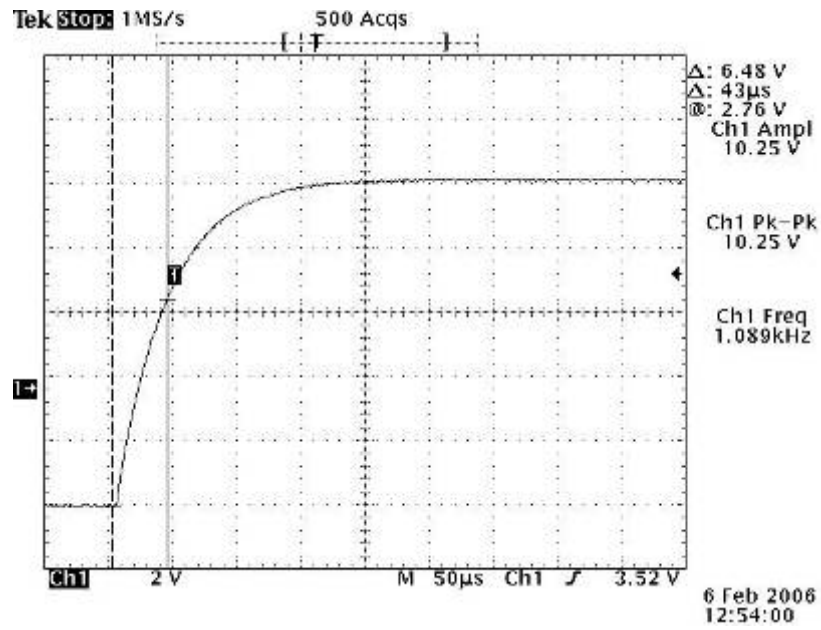


Figura 97 – Rampa de subida para o capacitor de 10 (mm) de largura por 250 (mm) de comprimento, espaçamento de 0,7 (mm) e *layout* em E



## Anexo III – Código fonte para determinação do rotor

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% DETERMINAÇÃO DO ROTOR %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% PARTE 1 - ENTRADA E ANÁLISE DOS DADOS %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%limpa workspace
clear all;

% dados hipotéticos aquisitados do rotor mm
medidas_S1=[1.3 2.2 2.6 1.9 2.2 2.5 2.7 2.6 1.3]; %0 grau

% raios nominais do rotor e raio do estator mm
Rne=15;
Rnr=12;

% gap nominal
Gn=Rne-Rnr;

% sentido de rotação
% horario = 1
% antihorario = -1
sentido=1;

% medidas dos sensores convertidas em (x,y) para desenhar os polos
% referentes a cada sensor
dp=360/(length(medidas_S1)-1);
for i=1:length(medidas_S1)
    if (sentido==1)
        angulos_S1(i)=(0+(i-1)*dp);
    else
        angulos_S1(i)=(360+(i-1)*-1*dp);
    end
    [S1xi(i),S1yi(i)]=pol2cart(angulos_S1(i)*pi/180,Rne-
medidas_S1(i));

```

```

end

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% PARTE 2 - PLOTAGEM DAS CIRCUNFERÊNCIAS DE REFERÊNCIA %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% define parâmetros do gráfico
figure;
hold on;
grid on;
xlabel('X mm');
ylabel('Y mm');
title('Circunferências de referência');

% evita achatamento do gráfico
set(gca,'DataAspectRatioMode','manual')

% gera dados para plotar o rotor e estator de referência
[Circ_x,Circ_y] = scircle1(0,0,1);
Rotor_refx=Circ_x*Rnr;
Rotor_refy=Circ_y*Rnr;
Estator_refx=Circ_x*Rne;
Estator_refy=Circ_y*Rne;

% plota rotor e estator de referência
plot(Rotor_refx,Rotor_refy,':','LineWidth',2,'Color',[0.5 0.5 0.5]);
plot(Estator_refx,Estator_refy,':','LineWidth',2,'Color',[0.5 0.5
0.5]);

% plota centro das circunferencias de referencia
plot(0,0,'x','LineWidth',2,'Color',[0.5 0.5 0.5]);

% plota sensores no estator de referência
plot(Rne,0,'s','LineWidth',2,'Color',[0.5 0.5 0.5]); text(Rne,0,'S1');
% S1

% libera gráfico
hold off;

```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% PARTE 3 - PLOTAGEM DOS PONTOS AQUISITADOS %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% define parâmetros do gráfico
figure;
hold on;
grid on;
xlabel('X mm');
ylabel('Y mm');
if (sentido==-1)
    title('Medidas do sensor S1 - Sentido de rotação: ANTI-HORÁRIO');
else
    title('Medidas do sensor S1 - Sentido de rotação: HORÁRIO');
end

% evita achatamento do gráfico
set(gca,'DataAspectRatioMode','manual')

% plota rotor e estator de referência
plot(Rotor_refx,Rotor_refy,':','LineWidth',2,'Color',[0.5 0.5 0.5]);
plot(Estator_refx,Estator_refy,':','LineWidth',2,'Color',[0.5 0.5
0.5]);

% plota centro das circunferencias de referencia
plot(0,0,'x','LineWidth',2,'Color',[0.5 0.5 0.5]);

% plota sensores no estator de referência
plot(Rne,0,'s','LineWidth',2,'Color',[0.5 0.5 0.5]); text(Rne,0,'S1');
% S1

% plota os pontos aquisitados do sensor 1
plot(S1xi,S1yi,'x','LineWidth',2,'Color',[0 0 0]);

% marca nome dos pontos
for i=1:length(medidas_S1)-1
    text(S1xi(i),S1yi(i),strcat('P',+int2str(i)));
end
end

```

```

% libera gráfico
hold off;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% PARTE 4 - UNIÃO DOS PONTOS PLOTADOS %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% define parâmetros do gráfico
figure;
hold on;
grid on;
xlabel('X mm');
ylabel('Y mm');
if (sentido==-1)
    title('União das medidas do sensor S1 - Sentido de rotação: ANTI-
HORÁRIO');
else
    title('União das medidas do sensor S1 - Sentido de rotação:
HORÁRIO');
end

% evita achatamento do gráfico
set(gca,'DataAspectRatioMode','manual')

% plota rotor e estator de referência
plot(Rotor_refx,Rotor_refy,':','LineWidth',2,'Color',[0.5 0.5 0.5]);
plot(Estator_refx,Estator_refy,':','LineWidth',2,'Color',[0.5 0.5
0.5]);

% plota centro das circunferencias de referencia
plot(0,0,'x','LineWidth',2,'Color',[0.5 0.5 0.5]);

% plota sensores no estator de referência
plot(Rne,0,'s','LineWidth',2,'Color',[0.5 0.5 0.5]); text(Rne,0,'S1');
% S1

% une os pontos adquiridos do sensor 1
plot(S1xi,S1yi,'LineWidth',2,'Color',[0 0 0]);

```

```

% plota os pontos adquiridos do sensor 1
plot(S1xi,S1yi,'x','LineWidth',2,'Color',[0 0 0]);

% marca nome dos pontos
for i=1:length(medidas_S1)-1
    text(S1xi(i),S1yi(i),strcat('P',+int2str(i)));
end

% libera gráfico
hold off;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% PARTE 5 - PLOTAGEM DOS PONTOS AQUISITADOS C/ SUAVIZAÇÃO %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% define parâmetros do gráfico
figure;
hold on;
grid on;
xlabel('X mm');
ylabel('Y mm');
if (sentido== -1)
    title('Suavização das medidas do sensor S1 - Sentido de rotação:
ANTI-HORÁRIO');
else
    title('Suavização das medidas do sensor S1 - Sentido de rotação:
HORÁRIO');
end

% evita achatamento do gráfico
set(gca,'DataAspectRatioMode','manual')

% plota rotor e estator de referência
plot(Rotor_refx,Rotor_refy,':','LineWidth',2,'Color',[0.5 0.5 0.5]);
plot(Estator_refx,Estator_refy,':','LineWidth',2,'Color',[0.5 0.5
0.5]);

% plota centro das circunferencias de referencia
plot(0,0,'x','LineWidth',2,'Color',[0.5 0.5 0.5]);

```

```

% plota sensores no estator de referência
plot(Rne,0,'s','LineWidth',2,'Color',[0.5 0.5 0.5]); text(Rne,0,'S1');
% S1

% plota os pontos adquiridos do sensor 1
plot(S1xi,S1yi,'x','LineWidth',2,'Color',[0 0 0]);

% marca nome dos pontos
for i=1:length(medidas_S1)-1
    text(S1xi(i),S1yi(i),strcat('P',+int2str(i)));
end

% traça spline nos pontos adquiridos do sensor 1, usando + 1 leitura
for i=1:length(medidas_S1)
    y_rotor(i)=Rne-medidas_S1(i);
    x_rotor(i)=angulos_S1(i)*pi/180;
end
y_rotor(length(y_rotor)+1)=Rne-medidas_S1(1);
if (sentido==1)

x_rotor(length(x_rotor)+1)=(angulos_S1(length(angulos_S1))+45)*pi/180;
else
    x_rotor(length(x_rotor)+1)=(angulos_S1(length(angulos_S1))-
45)*pi/180;
end
xx_rotor=0:pi/180:2*pi;
yy_rotor=spline(x_rotor,y_rotor,xx_rotor);
for i=1:length(xx_rotor)

[Rotor_spline_xi(i),Rotor_spline_yi(i)]=pol2cart(xx_rotor(i),yy_rotor(
i));
end
plot(Rotor_spline_xi,Rotor_spline_yi,'LineWidth',2,'Color',[0 0 0]);

% libera gráfico
hold off;

```



```

% define parâmetros do gráfico
figure;
hold on;
grid on;
xlabel('X mm');
ylabel('Y mm');
title('Circunferências de referência');

% evita achatamento do gráfico
set(gca, 'DataAspectRatioMode', 'manual')

% gera dados para plotar o rotor e estator de referência
[Circ_x,Circ_y] = scircle1(0,0,1);
Rotor_refx=Circ_x*Rnr;
Rotor_refy=Circ_y*Rnr;
Estator_refx=Circ_x*Rne;
Estator_refy=Circ_y*Rne;

% plota rotor e estator de referência
plot(Rotor_refx,Rotor_refy,':','LineWidth',2,'Color',[0.5 0.5 0.5]);
plot(Estator_refx,Estator_refy,':','LineWidth',2,'Color',[0.5 0.5
0.5]);

% plota centro das circunferencias de referencia
plot(0,0,'x','LineWidth',2,'Color',[0.5 0.5 0.5]);

% plota sensores no estator de referência
for i=1:Ns
    [Sx,Sy]=pol2cart(-(ds*(i-1))*pi/180,Rne);
    plot(Sx,Sy,'s','LineWidth',2,'Color',[0.5 0.5 0.5]);
    text(Sx,Sy, strcat('S',int2str(i)));
end

% libera gráfico
hold off;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% PARTE 3 - PLOTAGEM DOS SENSORES EM SUAS POSIÇÕES REAIS %

```





```

% PARTE 4 - PLOTAGEM DO ROTOR C/ SUAUIZAÇÃO %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% define parâmetros do gráfico
figure;
hold on;
grid on;
xlabel('X mm');
ylabel('Y mm');
title('Suavização das medidas do estator - Disposição HORÁRIA');

% evita achatamento do gráfico
set(gca,'DataAspectRatioMode','manual')

% plota rotor e estator de referência
plot(Rotor_refx,Rotor_refy,':','LineWidth',2,'Color',[0.5 0.5 0.5]);
plot(Estator_refx,Estator_refy,':','LineWidth',2,'Color',[0.5 0.5
0.5]);

% plota centro das circunferencias de referencia
plot(0,0,'x','LineWidth',2,'Color',[0.5 0.5 0.5]);

% plota sensores no estator de referência
for i=1:Ns
    [Sx,Sy]=pol2cart(-(ds*(i-1))*pi/180,Rne);
    plot(Sx,Sy,'s','LineWidth',2,'Color',[0.5 0.5 0.5]);
    text(Sx,Sy, strcat('S',int2str(i)));
end

% plota sensores no estator usando medidas reais
for i=1:Ns
    [Sx,Sy]=pol2cart(-(ds*(i-1))*pi/180,Rne-erro_S(i));
    plot(Sx,Sy,'s','LineWidth',2,'Color',[0 0 0]);
    text(Sx,Sy, strcat('S',int2str(i)));
end

% calcula spline nos pontos do estator
for i=1:Ns+1
    if (i==Ns+1)
        y_estator(i)=Rne-erro_S(1);
    end
end

```

```
else
    y_estator(i)=Rne-erro_S(i);
end
x_estator(i)=(360-(i-1)*ds)*pi/180;
end
xx_estator=0:pi/180:2*pi;
yy_estator=spline(x_estator,y_estator,xx_estator);
for i=1:length(xx_estator)

    [Estator_spline_xi(i),Estator_spline_yi(i)]=pol2cart(xx_estator(i),yy_
estator(i));
end
% plota estator com pontos suavizados
plot(Estator_spline_xi,Estator_spline_yi,'LineWidth',2,'Color',[0 0
0]);

% libera gráfico
hold off;
```

## Anexo V – Código fonte adicional para determinação do rotor

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% PARTE 6 - DETERMINAÇÃO DO RAIO E CENTRO DA CIRCUNFERÊNCIA DO ROTOR %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% define parâmetros do gráfico
figure;
hold on;
grid on;
xlabel('X mm');
ylabel('Y mm');
if (sentido== -1)
    title('Melhor circunferência para as medidas do sensor S1 -
Sentido de rotação: ANTI-HORÁRIO');
else
    title('Melhor circunferência para as medidas do sensor S1 -
Sentido de rotação: HORÁRIO');
end

% evita achatamento do gráfico
set(gca,'DataAspectRatioMode','manual')

% plota rotor e estator de referência
plot(Rotor_refx,Rotor_refy,':','LineWidth',2,'Color',[0.5 0.5 0.5]);
plot(Estator_refx,Estator_refy,':','LineWidth',2,'Color',[0.5 0.5
0.5]);

% plota centro das circunferencias de referencia
plot(0,0,'x','LineWidth',2,'Color',[0.5 0.5 0.5]);

% plota sensores no estator de referência
plot(Rne,0,'s','LineWidth',2,'Color',[0.5 0.5 0.5]); text(Rne,0,'S1');
% S1

% a circunferência do rotor é em função dos dados do sensor 1
Rotor_xi=S1xi;

```

```

Rotor_yi=Slyi;

% plota os pontos adquiridos do sensor 1
plot(S1xi,Slyi,'x','LineWidth',2,'Color',[0 0 0]);

% marca nome dos pontos
for i=1:length(medidas_S1)-1
    text(S1xi(i),Slyi(i),strcat('P',+int2str(i)));
end

% calcula as coordenadas do centro da circunferência e seu raio por
MLS
n=length(Rotor_xi);
A=n*(n-1)*var(Rotor_xi); % variancia
B=n*(n-1)*diag(cov(Rotor_xi,Rotor_yi),1); % covariancia
C=n*(n-1)*var(Rotor_yi); %variancia
for i=1:length(Rotor_xi)
    xi2(i)=Rotor_xi(i)^2;
    yi2(i)=Rotor_yi(i)^2;
end
D=0.5*n*(n-1)*(diag(cov(Rotor_xi,yi2),1)+diag(cov(Rotor_xi,xi2),1));
E=0.5*n*(n-1)*(diag(cov(Rotor_yi,xi2),1)+diag(cov(Rotor_yi,yi2),1));
Rotor_xc=(D*C-B*E)/(A*C-(B^2));
Rotor_yc=(A*E-B*D)/(A*C-(B^2));
for i=1:length(Rotor_xi)
    rm(i)=sqrt((Rotor_xi(i)-Rotor_xc)^2+(Rotor_yi(i)-Rotor_yc)^2)/n;
end
Rotor_r=sum(rm);

% gera pontos da circunferencia para a melhor circunferência do rotor
for i=1:101
    [Rotor_x(i),Rotor_y(i)]=pol2cart((i-1)*(3.6)*pi/180,Rotor_r);
    Rotor_x(i)=Rotor_x(i)+Rotor_xc;
    Rotor_y(i)=Rotor_y(i)+Rotor_yc;
end

% plota a circunferência encontrada e seu centro
plot(Rotor_x,Rotor_y,'LineWidth',2,'Color',[0 0 0]);
plot(Rotor_xc,Rotor_yc,'x','LineWidth',2,'Color',[0 0 0]);

```

```
% mostra resultados no workspace
sprintf('Melhor circunferência para o rotor mm: [Xc=%f] [Yc=%f]
[Raio=%f]',Rotor_xc,Rotor_yc,Rotor_r)

% libera gráfico
hold off;
```

## Anexo VI – Código fonte adicional para determinação do estator

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%
% PARTE 5 - DETERMINAÇÃO DO RAI0 E CENTRO DA CIRCUNFERÊNCIA DO ESTATOR
%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%

% define parâmetros do gráfico
figure;
hold on;
grid on;
xlabel('X mm');
ylabel('Y mm');
title('Melhor circunferência do estator para as medidas do sensor S1 -
Disposição HORÁRIA');

% evita achatamento do gráfico
set(gca,'DataAspectRatioMode','manual');

% plota rotor e estator de referência
plot(Rotor_refx,Rotor_refy,':','LineWidth',2,'Color',[0.5 0.5 0.5]);
plot(Estator_refx,Estator_refy,':','LineWidth',2,'Color',[0.5 0.5
0.5]);

% plota centro das circunferencias de referencia
plot(0,0,'x','LineWidth',2,'Color',[0.5 0.5 0.5]);

% plota sensores no estator de referência
for i=1:Ns
    [Sx,Sy]=pol2cart(-(ds*(i-1))*pi/180,Rne);
    plot(Sx,Sy,'s','LineWidth',2,'Color',[0.5 0.5 0.5]);
    text(Sx,Sy, strcat('S',int2str(i)));
end

% plota sensores no estator usando medidas reais

```

```

for i=1:Ns
    [Sx,Sy]=pol2cart(-(ds*(i-1))*pi/180,Rne-erro_S(i));
    plot(Sx,Sy,'s','LineWidth',2,'Color',[0 0 0]);
    text(Sx,Sy, strcat('S',int2str(i)));
end

% os dados do estator são referentes às posições do sensores
for i=1:Ns
    [Estator_xi(i),Estator_yi(i)]=pol2cart(-(ds*(i-1))*pi/180,Rne-
erro_S(i));
end

% calcula as coordenadas do centro da circunferência e seu raio por
MLS
n=length(Estator_xi);
A=n*(n-1)*var(Estator_xi); % variancia
B=n*(n-1)*diag(cov(Estator_xi,Estator_yi),1); % covariancia
C=n*(n-1)*var(Estator_yi); %variancia
for i=1:length(Estator_xi)
    xi2(i)=Estator_xi(i)^2;
    yi2(i)=Estator_yi(i)^2;
end
D=0.5*n*(n-
1)*(diag(cov(Estator_xi,yi2),1)+diag(cov(Estator_xi,xi2),1));
E=0.5*n*(n-
1)*(diag(cov(Estator_yi,xi2),1)+diag(cov(Estator_yi,yi2),1));
Estator_xc=(D*C-B*E)/(A*C-(B^2));
Estator_yc=(A*E-B*D)/(A*C-(B^2));
for i=1:length(Estator_xi)
    rm(i)=sqrt((Estator_xi(i)-Estator_xc)^2+(Estator_yi(i)-
Estator_yc)^2)/n;
end
Estator_r=sum(rm);

% gera pontos da circunferencia para a melhor circunferência do rotor
for i=1:101
    [Estator_x(i),Estator_y(i)]=pol2cart((i-
1)*(3.6)*pi/180,Estator_r);
    Estator_x(i)=Estator_x(i)+Estator_xc;
    Estator_y(i)=Estator_y(i)+Estator_yc;
end

```



```
end
```

```
% plota a circunferência encontrada e seu centro
```

```
plot(Estator_x,Estator_y,'LineWidth',2,'Color',[0 0 0]);
```

```
plot(Estator_xc,Estator_yc,'x','LineWidth',2,'Color',[0 0 0]);
```

```
% mostra resultados no workspace
```

```
sprintf('Melhor circunferência para o estator mm: [Xc=%f] [Yc=%f]
```

```
[Raio=%f]',Estator_xc,Estator_yc,Estator_r)
```

```
% libera gráfico
```

```
hold off;
```

## Anexo VII – Código fonte para análise do gerador 2

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% DETERMINAÇÃO DO ROTOR DO GERADOR 2 %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% PARTE 1 - ENTRADA E ANÁLISE DOS DADOS %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%limpa workspace
clear all;

% dados aquisitados do rotor (10 medidas + repetição da primeira) em
mm
medidas_S1=[4.802 4.802 4.802 4.801 4.802 4.801 4.802 4.801 4.801
4.801 4.802]; %0 grau

% raios nominais do rotor e raio do estator mm
Rne=1300/2;
% gap nominal mm
Gn=4.8;
% calculo do raio nominal do rotor mm
Rnr=Rne-Gn;

% sentido de rotação
% horario = 1
% antihorario = -1
sentido=1;

% medidas dos sensores convertidas em (x,y) para desenhar os rotores
% referentes a cada sensor
ds=360/(length(medidas_S1)-1);
for i=1:length(medidas_S1)
    if (sentido==1)
        angulos_S1(i)=(0+(i-1)*ds);
    else
        angulos_S1(i)=(360+(i-1)*-1*ds);
    end
end

```

```

    [S1xi(i),S1yi(i)]=pol2cart(angulos_S1(i)*pi/180,Rne-
medidas_S1(i));
end

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% PARTE 2 - PLOTAGEM DAS CIRCUNFERÊNCIAS DE REFERÊNCIA %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% define parâmetros do gráfico
figure;
hold on;
grid on;
xlabel('X mm');
ylabel('Y mm');
title('Circunferências de referência');

% evita achatamento do gráfico
set(gca,'DataAspectRatioMode','manual')

% gera dados para plotar o rotor e estator de referência
[Circ_x,Circ_y] = scircle1(0,0,1);
Rotor_refx=Circ_x*Rnr;
Rotor_refy=Circ_y*Rnr;
Estator_refx=Circ_x*Rne;
Estator_refy=Circ_y*Rne;

% plota sensores no estator de referência
plot(Rne,0,'s','LineWidth',2,'Color',[0.5 0.5 0.5]); text(Rne,0,'S1');
% S1

% plota rotor e estator de referência
plot(Rotor_refx,Rotor_refy,':','LineWidth',2,'Color',[0.5 0.5 0.5]);
plot(Estator_refx,Estator_refy,':','LineWidth',2,'Color',[0.5 0.5
0.5]);

% plota centro das circunferencias de referencia
plot(0,0,'x','LineWidth',2,'Color',[0.5 0.5 0.5]);

% libera gráfico

```

```

hold off;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% PARTE 3 - PLOTAGEM DOS PONTOS AQUISITADOS %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% define parâmetros do gráfico
figure;
hold on;
grid on;
xlabel('X mm');
ylabel('Y mm');
if (sentido==-1)
    title('Medidas do sensor S1 - Sentido de rotação: ANTI-HORÁRIO');
else
    title('Medidas do sensor S1 - Sentido de rotação: HORÁRIO');
end

% evita achatamento do gráfico
set(gca, 'DataAspectRatioMode', 'manual')

% plota rotor e estator de referência
plot(Rotor_refx,Rotor_refy, ':', 'LineWidth',2, 'Color', [0.5 0.5 0.5]);
plot(Estator_refx,Estator_refy, ':', 'LineWidth',2, 'Color', [0.5 0.5
0.5]);

% plota centro das circunferencias de referencia
plot(0,0, 'x', 'LineWidth',2, 'Color', [0.5 0.5 0.5]);

% plota sensores no estator de referência
plot(Rne,0, 's', 'LineWidth',2, 'Color', [0.5 0.5 0.5]); text(Rne,0, 'S1');
% S1

% plota os pontos aquisitados do sensor 1
plot(S1xi,S1yi, 'x', 'LineWidth',2, 'Color', [0 0 0]);

% marca nome dos pontos
for i=1:length(medidas_S1)-1
    text(S1xi(i),S1yi(i), strcat('P',+int2str(i)));

```

```

end

% libera gráfico
hold off;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% PARTE 4 - PLOTAGEM DOS PONTOS AQUISITADOS EM UNIÃO %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% define parâmetros do gráfico
figure;
hold on;
grid on;
xlabel('X mm');
ylabel('Y mm');
if (sentido==-1)
    title('União das medidas do sensor S1 - Sentido de rotação: ANTI-
HORÁRIO');
else
    title('União das medidas do sensor S1 - Sentido de rotação:
HORÁRIO');
end

% evita achatamento do gráfico
set(gca,'DataAspectRatioMode','manual')

% plota rotor e estator de referência
plot(Rotor_refx,Rotor_refy,':','LineWidth',2,'Color',[0.5 0.5 0.5]);
plot(Estator_refx,Estator_refy,':','LineWidth',2,'Color',[0.5 0.5
0.5]);

% plota centro das circunferencias de referencia
plot(0,0,'x','LineWidth',2,'Color',[0.5 0.5 0.5]);

% plota sensores no estator de referência
plot(Rne,0,'s','LineWidth',2,'Color',[0.5 0.5 0.5]); text(Rne,0,'S1');
% S1

% une os pontos aquisitados do sensor 1

```

```

plot(Slxi,Slyi,'LineWidth',2,'Color',[0 0 0]);

% plota os pontos adquiridos do sensor 1
plot(Slxi,Slyi,'x','LineWidth',2,'Color',[0 0 0]);

% marca nome dos pontos
for i=1:length(medidas_S1)-1
    text(Slxi(i),Slyi(i),strcat('P',+int2str(i)));
end

% libera gráfico
hold off;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% PARTE 5 - PLOTAGEM DOS PONTOS AQUISITADOS C/ SUAVIZAÇÃO %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% define parâmetros do gráfico
figure;
hold on;
grid on;
xlabel('X mm');
ylabel('Y mm');
if (sentido== -1)
    title('Suavização das medidas do sensor S1 - Sentido de rotação:
ANTI-HORÁRIO');
else
    title('Suavização das medidas do sensor S1 - Sentido de rotação:
HORÁRIO');
end

% evita achatamento do gráfico
set(gca,'DataAspectRatioMode','manual')

% plota rotor e estator de referência
plot(Rotor_refx,Rotor_refy,':','LineWidth',2,'Color',[0.5 0.5 0.5]);
plot(Estator_refx,Estator_refy,':','LineWidth',2,'Color',[0.5 0.5
0.5]);

```

```

% plota centro das circunferencias de referencia
plot(0,0,'x','LineWidth',2,'Color',[0.5 0.5 0.5]);

% plota sensores no estator de referênciã
plot(Rne,0,'s','LineWidth',2,'Color',[0.5 0.5 0.5]); text(Rne,0,'S1');
% S1

% plota os pontos aquisitados do sensor 1
plot(S1xi,S1yi,'x','LineWidth',2,'Color',[0 0 0]);

% marca nome dos pontos
for i=1:length(medidas_S1)-1
    text(S1xi(i),S1yi(i),strcat('P',+int2str(i)));
end

% traça spline nos pontos aquisitados do sensor 1, usando + 1 leitura
for i=1:length(medidas_S1)
    y_rotor(i)=Rne-medidas_S1(i);
    x_rotor(i)=angulos_S1(i)*pi/180;
end
y_rotor(length(y_rotor)+1)=Rne-medidas_S1(1);
if (sentido==1)

x_rotor(length(x_rotor)+1)=(angulos_S1(length(angulos_S1))+45)*pi/180;
else
    x_rotor(length(x_rotor)+1)=(angulos_S1(length(angulos_S1))-
45)*pi/180;
end
xx_rotor=0:pi/180:2*pi;
yy_rotor=spline(x_rotor,y_rotor,xx_rotor);
for i=1:length(xx_rotor)

[Rotor_spline_xi(i),Rotor_spline_yi(i)]=pol2cart(xx_rotor(i),yy_rotor(
i));
end
plot(Rotor_spline_xi,Rotor_spline_yi,'LineWidth',2,'Color',[0 0 0]);

% libera gráfico
hold off;

```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% PARTE 6 - DETERMINAÇÃO DO RAIOS E CENTRO DA CIRCUNFERÊNCIA DO ROTOR %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% define parâmetros do gráfico
figure;
hold on;
grid on;
xlabel('X mm');
ylabel('Y mm');
if (sentido== -1)
    title('Melhor circunferência para as medidas do sensor S1 -
Sentido de rotação: ANTI-HORÁRIO');
else
    title('Melhor circunferência para as medidas do sensor S1 -
Sentido de rotação: HORÁRIO');
end

% evita achatamento do gráfico
set(gca, 'DataAspectRatioMode', 'manual')

% plota rotor e estator de referência
plot(Rotor_refx, Rotor_refy, ':', 'LineWidth', 2, 'Color', [0.5 0.5 0.5]);
plot(Estator_refx, Estator_refy, ':', 'LineWidth', 2, 'Color', [0.5 0.5
0.5]);

% plota centro das circunferências de referência
plot(0, 0, 'x', 'LineWidth', 2, 'Color', [0.5 0.5 0.5]);

% plota sensores no estator de referência
plot(Rne, 0, 's', 'LineWidth', 2, 'Color', [0.5 0.5 0.5]); text(Rne, 0, 'S1');
% S1

% plota os pontos adquiridos do sensor 1
plot(S1xi, S1yi, 'x', 'LineWidth', 2, 'Color', [0 0 0]);

% marca nome dos pontos
for i=1:length(medidas_S1)-1
    text(S1xi(i), S1yi(i), strcat('P', int2str(i)));
end
end

```



```

% a circunferência do rotor é em função dos dados do sensor 1
Rotor_xi=S1xi;
Rotor_yi=S1yi;

% calcula as coordenadas do centro da circunferência e seu raio por
MLS
n=length(Rotor_xi);
A=n*(n-1)*var(Rotor_xi); % variancia
B=n*(n-1)*diag(cov(Rotor_xi,Rotor_yi),1); % covariancia
C=n*(n-1)*var(Rotor_yi); %variancia
for i=1:length(Rotor_xi)
    xi2(i)=Rotor_xi(i)^2;
    yi2(i)=Rotor_yi(i)^2;
end
D=0.5*n*(n-1)*(diag(cov(Rotor_xi,yi2),1)+diag(cov(Rotor_xi,xi2),1));
E=0.5*n*(n-1)*(diag(cov(Rotor_yi,xi2),1)+diag(cov(Rotor_yi,yi2),1));
Rotor_xc=(D*C-B*E)/(A*C-(B^2));
Rotor_yc=(A*E-B*D)/(A*C-(B^2));
for i=1:length(Rotor_xi)
    rm(i)=sqrt((Rotor_xi(i)-Rotor_xc)^2+(Rotor_yi(i)-Rotor_yc)^2)/n;
end
Rotor_r=sum(rm);

% gera pontos da circunferencia para a melhor circunferência do rotor
for i=1:101
    [Rotor_x(i),Rotor_y(i)]=pol2cart((i-1)*(3.6)*pi/180,Rotor_r);
    Rotor_x(i)=Rotor_x(i)+Rotor_xc;
    Rotor_y(i)=Rotor_y(i)+Rotor_yc;
end

% plota a circunferência encontrada e seu centro
plot(Rotor_x,Rotor_y,'LineWidth',2,'Color',[0 0 0]);
plot(Rotor_xc,Rotor_yc,'x','LineWidth',2,'Color',[0 0 0]);

% mostra resultados no workspace
sprintf('Melhor circunferência para o rotor mm: [Xc=%f] [Yc=%f]
[Raio=%f]',Rotor_xc,Rotor_yc,Rotor_r)
% libera gráfico
hold off;

```

## Anexo VIII – Código fonte para a determinação da oscilação do entreferro do rotor

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% OSCILAÇÃO DO ROTOR %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% PARTE 1 - ENTRADA E ANÁLISE DOS DADOS %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

clear all;

% carrega medidas na memoria
load x.dat;

% quantidade de pontos
pontos=100;

%periodo
periodo=17;

% raios nominais do rotor e raio do estator mm
Rne=1300/2;

% gap nominal mm
Gn=4.8;

% calculo do raio nominal do rotor mm
Rnr=Rne-Gn;

%polos
polos=10;

% sentido de rotação
% horario = 1
% antihorario = -1
```

```

sentido=1;

% inicio da varredura do sinal
inicio=82;

% varredura
for l=1:pontos/polos
    for c=1:polos
        medidas_S1(l,c)=min(x((inicio:inicio+periodo)));
        inicio=inicio+periodo;
    end
end

% medidas dos sensores convertidas em (x,y) para desenhar os rotores
% referentes a cada sensor
ds=360/polos;
for l=1:pontos/polos
    for c=1:polos
        if (sentido==1)
            angulos_S1(l,c)=(0+(c-1)*ds);
        else
            angulos_S1(l,c)=(360+(c-1)*-1*ds);
        end
    end
end

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% PARTE 2 - PLOTAGEM DE CIRCUNFERÊNCIAS C/ SUAVIZAÇÃO %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% define parâmetros do gráfico
figure;
hold on;
grid on;
xlabel('X mm');
ylabel('Y mm');
if (sentido==-1)
    title('Circunferências pelo sensor S1 com suavização - Sentido de
rotação: ANTI-HORÁRIO');
else

```

```

        title('Circunferências pelo sensor S1 com suavização - Sentido de
rotação: HORÁRIO');
end

% evita achatamento do gráfico
set(gca, 'DataAspectRatioMode', 'manual')

% gera dados para plotar o rotor e estator de referência
[Circ_x, Circ_y] = scircle1(0,0,1);
Rotor_refx=Circ_x*Rnr;
Rotor_refy=Circ_y*Rnr;
Estator_refx=Circ_x*Rne;
Estator_refy=Circ_y*Rne;

% plota rotor e estator de referência
plot(Rotor_refx,Rotor_refy, ':', 'LineWidth',2, 'Color', [0.5 0.5 0.5]);
plot(Estator_refx,Estator_refy, ':', 'LineWidth',2, 'Color', [0.5 0.5
0.5]);

% plota centro das circunferencias de referencia
plot(0,0, 'x', 'LineWidth',2, 'Color', [0.5 0.5 0.5]);

% plota sensores no estator de referência
plot(Rne,0, 's', 'LineWidth',2, 'Color', [0.5 0.5 0.5]); text(Rne,0, 'S1');
% S1

for j=1:pontos/polos

    % calcula spline nos pontos aquisitados
    for i=1:polos
        y_rotor(i)=Rne-medidas_S1(j,i);
        x_rotor(i)=angulos_S1(j,i)*pi/180;
    end
    y_rotor(length(y_rotor)+1)=Rne-medidas_S1(j,1);
    if (sentido==1)
        x_rotor(length(x_rotor)+1)=(angulos_S1(j,polos)+45)*pi/180;
    else
        x_rotor(length(x_rotor)+1)=(angulos_S1(j,polos)-45)*pi/180;
    end
    end
xx_rotor=0:pi/180:2*pi;

```

```

yy_rotor=spline(x_rotor,y_rotor,xx_rotor);
for i=1:length(xx_rotor)

[Rotor_spline_xi(i),Rotor_spline_yi(i)]=pol2cart(xx_rotor(i),yy_rotor(
i));
end

% plota circunferencia com pontos da spline
plot(Rotor_spline_xi,Rotor_spline_yi,'LineWidth',2,'Color',[0 0
0]);

% apaga variaveis para nova plotagem
clear y_rotor;
clear x_rotor;
clear xx_rotor;
clear yy_rotor;
clear Rotor_spline_yi;
clear Rotor_spline_xi;

end

% libera gráfico
hold off;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% PARTE 3 - PLOTAGEM DAS MEDIDAS EM CIRCUNFERENCIA %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% define parâmetros do gráfico
figure;
hold on;
grid on;
xlabel('X mm');
ylabel('Y mm');
if (sentido==-1)
    title('Medidas do sensor S1 em circunferência - Sentido de
rotação: ANTI-HORÁRIO');
else
    title('Medidas do sensor S1 em circunferência - Sentido de
rotação: HORÁRIO');

```

```

end

% evita achatamento do gráfico
set(gca,'DataAspectRatioMode','manual')

for j=1:pontos/polos

    % calcula spline nos pontos adquiridos
    for i=1:polos
        y_rotor(i)=medidas_S1(j,i);
        x_rotor(i)=angulos_S1(j,i)*pi/180;
    end
    y_rotor(length(y_rotor)+1)=medidas_S1(j,1);
    if (sentido==1)
        x_rotor(length(x_rotor)+1)=(angulos_S1(j,polos)+45)*pi/180;
    else
        x_rotor(length(x_rotor)+1)=(angulos_S1(j,polos)-45)*pi/180;
    end
    xx_rotor=0:pi/180:2*pi;
    yy_rotor=spline(x_rotor,y_rotor,xx_rotor);
    for i=1:length(xx_rotor)

[Rotor_spline_xi(i),Rotor_spline_yi(i)]=pol2cart(xx_rotor(i),yy_rotor(
i));
        end

    % plota circunferencia com pontos da spline
    plot(Rotor_spline_xi,Rotor_spline_yi,'LineWidth',2,'Color',[0 0
0]);

    % apaga variaveis para nova plotagem
    clear y_rotor;
    clear x_rotor;
    clear xx_rotor;
    clear yy_rotor;
    clear Rotor_spline_yi;
    clear Rotor_spline_xi;
end

% libera gráfico
hold off;

```