



Universidade Federal de Campina Grande
Centro de Ciências e Tecnologia
Departamento de Engenharia Elétrica

Relatório de Estágio

Título:

Estudo e Parametragem de um Sensor de Posição
com Tecnologia LVDT

Aluno: Luiz Alberto Leite Filho

Orientador: Antônio Marcos N. Lima

Campina Grande, dezembro de 2005.



Biblioteca Setorial do CDSA. Fevereiro de 2021.

Sumé - PB

Título:
**Estudo e Parametragem de um Sensor de
Posição com Tecnologia LVDT**

Aluno:

Luiz Alberto Leite Filho

Orientador:

Antônio Marcos N. Lima

Campina Grande, dezembro de 2005.

SUMÁRIO

SUMÁRIO	1
ÍNDICE DAS FIGURAS	3
ÍNDICE DAS TABELAS	4
DICIONÁRIO	5
AGRADECIMENTOS	6
1 INTRODUÇÃO	7
2 APRESENTAÇÃO DA EMPRESA	7
2.1 SUA HISTÓRIA	8
2.2 SEUS PRODUTOS	8
2.2.1 <i>Os Cabos</i>	8
2.2.2 <i>Os Cabos de ignição Anti-Parasitas</i>	9
2.2.3 <i>Os sensores</i>	9
2.3 PRODUÇÃO	9
2.4 FATURAMENTO	10
2.5 PESQUISA E DESENVOLVIMENTO	11
3 O SENSOR LVDT	12
4 PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS	13
4.1 DESCRIÇÃO DOS EXPERIMENTOS	13
4.2 MONTAGENS	14
4.3 A BANCADA LINEAR	15
5 TRATAMENTO DO SINAL	16
6 SENSORES UTILIZADOS	18
7 IMPEDÂNCIAS	18
7.1 SENSOR 40MM	18
7.2 SENSOR 50MM V.1	21
7.3 SENSOR 50MM V.2	22
7.4 CONCLUSÃO	24
8 FREQUÊNCIA	24
8.1 SENSOR 40MM	25
8.2 SENSOR DE 50MM V.1	26
8.3 SENSOR 50MM V.2	27
8.4 CONCLUSÃO	28
9 GEOMETRIA	28
9.1 ENTREFERROS E LINEARIDADES DAS CURVAS DOS SENSORES	28
9.1.1 <i>Sensor 50mm V.1</i>	28
9.1.2 <i>Sensor 50mm V.2</i>	32
9.2 POSIÇÃO DO EIXO DE REALIMENTAÇÃO	35
9.3 BOBINAS MAIS ESPAÇADAS	36
9.4 DIVERSOS EIXOS POLARES	38
9.5 DIVERSOS EIXOS DE REALIMENTAÇÃO	43
9.6 CONCLUSÃO	45
10 TEMPERATURA	45
10.1 SENSOR 50MM V.1	45
10.2 SENSOR 50MM V.2	47
10.3 CONCLUSÃO	50
11 FATORES EXTERNOS	51
11.1 LIMALHA DE FERRO	51

11.1.1	Resultados	51
11.1.2	Conclusão	54
11.2	MICRO VARIAÇÃO DE ENTREFERRO	54
11.2.1	Resultados	54
11.2.2	Conclusão	55
11.3	HISTERESE	56
12	MODELO ELÉTRICO DO SENSOR.....	59
12.1	MODELO TEÓRICO	59
12.2	EXPERIMENTO	59
12.2.1	Material utilizado	59
12.2.2	Medições.....	60
12.2.3	Conclusão	61
13	RESUMO DOS RESULTADOS	62
13.1	TABELA DE IMPEDÂNCIA	62
13.2	TABELA DO COMPRIMENTO ÚTIL MÁXIMO	62
13.3	TABELA DOS SINAIS DO SENSOR.....	63
13.4	TABELA DAS INFLUÊNCIAS	63
14	ORGANIZAÇÃO	69
15	CONCLUSÃO	70
16	ANEXOS.....	71
16.1	DESENHO DO SENSOR.....	71
16.2	DESENHO DO ÍMÃ UTILIZADO	72

ÍNDICE DAS FIGURAS

Figura 1 -	As camadas do cabo de ignição.....	8
Figura 2 -	Sensores da Bosch fabricados na Electricfil.....	9
Figura 3 -	Posição dos produtos EFI dentro de um veículo.....	9
Figura 4 -	Faturamento das duas atividades Capteurs(sensores) e Allumage (ignição).....	10
Figura 5 -	Divisão geográfica do faturamento.....	10
Figura 6 -	Elementos do sensor LVDT estudado.....	12
Figura 7 -	Fluxo magnético e zona de saturação do sensor.....	12
Figura 8 -	Sinais do sensor em estudo.....	13
Figura 9 -	Montagem.....	14
Figura 10 -	Montagem com amperímetro.....	14
Figura 11 -	Mesa linear com o sensor.....	15
Figura 12 -	Efeito de frequência para cada tratamento do sinal.....	16
Figura 13 -	Efeito de amplitude para cada tratamento do sinal.....	17
Figura 14 -	Efeito de entreferro para cada tratamento do sinal.....	17
Figura 15 -	Posição do ímã e do eixo de realimentação em relação ao sensor.....	18
Figura 16 -	Resistência da bobina primária do sensor em função da posição do ímã.....	19
Figura 17 -	Indutância da bobina primária do sensor em função da posição do ímã.....	19
Figura 18 -	Impedância da bobina primária do sensor em função da posição do ímã.....	19
Figura 19 -	Resistência da bobina primária do sensor em função da posição do ímã.....	20
Figura 20 -	Indutância da bobina primária do sensor em função da posição do ímã.....	20
Figura 21 -	Impedância da bobina primária do sensor em função da posição do ímã.....	21
Figura 22 -	Resistência da bobina primária do sensor em função da posição do ímã.....	21
Figura 23 -	Indutância da bobina primária do sensor em função da posição do ímã.....	22
Figura 24 -	Impedância da bobina primária do sensor em função da posição do ímã.....	22
Figura 25 -	Posição do eixo de realimentação.....	22
Figura 26 -	Resistência da bobina primária do sensor em função da posição do ímã.....	23
Figura 27 -	Indutância da bobina primária do sensor em função da posição do ímã.....	23
Figura 28 -	Impedância da bobina primária do sensor em função da posição do ímã.....	23
Figura 29 -	Erro da impedância da bobina primária do sensor em função da posição do ímã.....	24
Figura 30 -	Rendimento do sensor para diferentes frequências, em cada secundário, para um sinal de entrada com 0,5V de amplitude.....	25
Figura 31 -	Rendimento do sensor para diferentes frequências, em cada secundário, para um sinal de entrada com 1V de amplitude.....	25
Figura 32 -	Rendimento do sensor para diferentes frequências, em cada secundário, para um sinal de entrada com 1V de amplitude.....	26
Figura 33 -	Rendimento do sensor para diferentes frequências, em cada secundário, para um sinal de entrada com 0,5V de amplitude.....	26
Figura 34 -	Rendimento do sensor para diferentes frequências, em cada secundário, para um sinal de entrada com 0,5V de amplitude.....	27
Figura 35 -	Rendimento do sensor para diferentes frequências, em cada secundário, para um sinal de entrada com 0,5V de amplitude.....	27
Figura 36 -	Posições do eixo de realimentação em relação ao sensor.....	28
Figura 37 -	Sinais brutos do sensor para posição do eixo de realimentação em baixo do sensor.....	29
Figura 38 -	Sinal diferencial do sensor para posição do eixo de realimentação em baixo do sensor.....	29
Figura 39 -	Sinal racionométrico do sensor para posição do eixo de realimentação em baixo do sensor.....	30
Figura 40 -	Sinal di/dt do sensor para posição do eixo de realimentação em baixo do sensor.....	30
Figura 41 -	Efeito de entreferro do sensor para posição do eixo de realimentação em baixo do sensor.....	31
Figura 42 -	Efeito de entreferro do sensor para posição do eixo de realimentação em baixo do sensor.....	31
Figura 43 -	Erro de não linearidade do sensor para posição do eixo de realimentação em baixo do sensor.....	32
Figura 44 -	Sinal bruto do sensor para posição do eixo de realimentação atrás do sensor.....	32
Figura 45 -	Sinal diferencial do sensor para posição do eixo de realimentação atrás do sensor.....	33
Figura 46 -	Sinal racionométrico do sensor para posição do eixo de realimentação atrás do sensor.....	33
Figura 47 -	Sinal di/dt do sensor para posição do eixo de realimentação atrás do sensor.....	33
Figura 48 -	Efeito de entreferro do sensor para posição do eixo de realimentação atrás do sensor.....	34
Figura 49 -	Efeito de entreferro do sensor para posição do eixo de realimentação atrás do sensor.....	34
Figura 50 -	Não linearidade dos sinais do sensor para posição do eixo de realimentação atrás do sensor.....	35
Figura 51 -	Comparação entre os sinais diferenciais com o eixo de realimentação em baixo (dessous) e atrás (derrière) do sensor para o entreferro de 1mm.....	35
Figura 52 -	Comparação entre os sinais diferenciais com o eixo de realimentação em baixo (dessous) e atrás (derrière) do sensor para o entreferro de 3mm.....	36
Figura 53 -	Comparação entre os sinais diferenciais dos sensores de 40mm e de 50mm de comprimento com eixos polares cilíndricos de 50mm.....	37
Figura 54 -	Efeito de entreferro no sensor de 40mm de comprimento.....	37
Figura 55 -	Efeito de entreferro no sensor de 50mm de comprimento.....	38
Figura 56 -	Sinal diferencial com eixo polar de 40mm para diversos entreferros.....	38
Figura 57 -	Sinal racionométrico com eixo polar de 40mm para diversos entreferros.....	39
Figura 58 -	Sinal di/dt com eixo polar de 40mm para diversos entreferros.....	39
Figura 59 -	Sinal diferencial com eixo polar de 45mm para diversos entreferros.....	40
Figura 60 -	Sinal racionométrico com eixo polar de 45mm para diversos entreferros.....	40

Figura 61 -	Sinal racionométrico com eixo polar de 45mm para diversos entreferros.	41
Figura 62 -	Sinal diferencial com eixo polar de 50mm para diversos entreferros.	41
Figura 63 -	Sinal racionométrico com eixo polar de 50mm para diversos entreferros.	41
Figura 64 -	Sinal racionométrico com eixo polar de 50mm para diversos entreferros.	42
Figura 65 -	Efeito entreferro com eixo polar de 40mm.....	42
Figura 66 -	Efeito entreferro com eixo polar de 45mm.....	42
Figura 67 -	Efeito entreferro com eixo polar de 50mm.....	43
Figura 68 -	Efeito entreferro com eixo realimentação plano de 45mm.	44
Figura 69 -	Efeito entreferro com eixo realimentação cilíndrico de 45mm.....	44
Figura 70 -	Efeito entreferro com eixo realimentação cilíndrico de 50mm.....	44
Figura 71 -	Sinal diferencial para o sensor submetido a diversas temperaturas.	46
Figura 72 -	Sinal racionométrico para o sensor submetido a diversas temperaturas.....	46
Figura 73 -	Sinal di/dt para o sensor submetido a diversas temperaturas.	46
Figura 74 -	Efeito de temperatura entre -40°C e 25°C	47
Figura 75 -	Efeito de temperatura entre 150°C e 25°C	47
Figura 76 -	Sinal diferencial para diversas temperaturas e entreferro de 1mm.	48
Figura 77 -	Sinal racionométrico para diversas temperaturas e entreferro de 1mm.	48
Figura 78 -	Sinal di/dt para diversas temperaturas e entreferro de 1mm.	48
Figura 79 -	Efeito de temperatura para entreferro de 1mm entre -40°C e 25°C.....	49
Figura 80 -	Efeito de temperatura para entreferro de 1mm entre 150°C e 25°C	50
Figura 81 -	Diversas quantidades de limalha de ferro sobre o ímã	51
Figura 82 -	Sinais brutos do sensor com diversas quantidades de limalha de ferro sobre o ímã.	51
Figura 83 -	Sinal diferencial do sensor com diversas quantidades de limalha de ferro sobre o ímã.	52
Figura 84 -	Sinal racionométrico do sensor com diversas quantidades de limalha de ferro sobre o ímã.	52
Figura 85 -	Sinal di/dt do sensor com diversas quantidades de limalha de ferro sobre o ímã.	53
Figura 86 -	Variação do sinal do sensor em função das quantidades de limalha de ferro sobre o ímã.....	53
Figura 87 -	Variação do sinal do sensor em função da pequena variação de entreferro.	54
Figura 88 -	Variação do sinal do sensor em função da pequena variação de entreferro, para vários tratamentos do sinal, com eixo polar de 55mm.....	55
Figura 89 -	Variação do sinal do sensor em função da pequena variação de entreferro, para vários tratamentos do sinal, com eixo polar de 55mm.....	55
Figura 90 -	Sinais brutos do sensor utilizando um eixo polar de FeNi para vários entreferros.	56
Figura 91 -	Sinais brutos do sensor utilizando um eixo polar de FeSi para vários entreferros.....	57
Figura 92 -	Sinal diferencial do sensor comparando os dois tipos de eixo polar.	57
Figura 93 -	Sinal racionométrico do sensor comparando os dois tipos de eixo polar.....	58
Figura 94 -	Sinal di/dt do sensor comparando os dois tipos de eixo polar.....	58
Figura 95 -	Erro de ida-volta do ímã para o eixo polar de FeSi.	58
Figura 96 -	Modelo simplificado do sensor LVDT.	59
Figura 97 -	Modelo do sensor com resistência paralelo R_p no secundário.	60
Figura 98 -	Curva da resistência do primário do sensor, mostrando os parâmetros a serem analisados.	62
Figura 99 -	Gráfico mostrando a zona monótona a ser analisada.	62
Figura 100 -	Sinais brutos de cada secundário do sensor LVDT.....	63

ÍNDICE DAS TABELAS

Tabela 1 -	Comprimento da Zona Monótona	34
Tabela 2 -	Comprimento da zona monótona	43
Tabela 3 -	Comprimento da zona monótona	45
Tabela 4 -	Amplitude e Fase	60
Tabela 5 -	Valores teóricos dos sinais em função da posição.....	61
Tabela 6 -	Parte real e imaginária dos sinais do sensor	61
Tabela 7 -	Valores experimentais dos sinais do sensor	61
Tabela 8 -	Tabela de Impedância	64
Tabela 9 -	Tabela de impedância.....	64
Tabela 10 -	Tabela de impedância.....	65
Tabela 11 -	Tabela de Impedância	65
Tabela 12 -	Tabela do comprimento útil máximo.....	66
Tabela 13 -	Tabela dos sinais do sensor	67
Tabela 14 -	Tabela das influências.....	68

DICIONÁRIO E ABREVIATURAS

LVDT	Transformador diferencial com variação linear
EFI	Electricfil
ϕ	Fluxo Magnético
N	Número de espiras
Diff	Tratamento diferencial
Ratio	Tratamento ratiométrico
Di/dt	Derivada da corrente do sensor

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à Deus, por ter me dado apoio espiritual para realizar os trabalhos deste estágio, aos meus pais que foram as pessoas que mais me apoiaram e deram condição para que este estágio se realizasse, à minha irmã que sempre me apoiou em tudo, e a minha noiva, pela confiança, compreensão e companheirismo em todas as horas.

Agradeço ao Sr. Olivier ANDRIEU e o Eng^o. Rainer MÖLLER por terem me guiado durante este estágio, pelos seus conselhos, e pelo rigor que eles exigiram de mim.

No laboratório, eu agradeço a Alain WEBER, pela sua ajuda e pelo seus conselhos técnicos no projeto desenvolvido.

Enfim, muito obrigado aos técnicos do laboratório EFI e ao serviço do pessoal do protótipo por sua simpatia e colaboração.

1 INTRODUÇÃO

A Electricfil Industrie é uma das mais importantes indústrias de peças para automóveis da França e, desde sua criação, esta empresa não para de ser inovadora, estando sempre desenvolvendo e utilizando novas tecnologias.

De fato, nos dias de hoje, os sensores estão cada vez mais presentes no desenvolvimento e na concepção dos automóveis.

Atualmente, a Electricfil Industrie oferece aos construtores de automóveis cabos de ignição e diferentes sensores de velocidade e de posição para o sistema moto-propulsor.

Meu tema de estágio foi o estudo dos parâmetros elétricos e geométricos de um sensor de posição que utiliza a tecnologia LVDT. Os sensores de posição são uma das principais linhas de desenvolvimento de sensores. A tecnologia LVDT (Linear Variable Differential Transformer) permite criar sensores de posição linear precisos e com ótimo desempenho.

O estudo proposto consistiu em estudar um sensor deste tipo sob o ângulo do desempenho. Foi proposto em particular de determinar os fatores geométricos deste princípio e de parametrizá-lo da melhor forma possível.

Inicialmente, eu apresentarei a empresa, logo em seguida eu descreverei as medidas, os resultados dos ensaios e suas respectivas conclusões no âmbito do desenvolvimento deste projeto.

2 APRESENTAÇÃO DA EMPRESA

A Electricfil Industrie (EFI) é uma equipadora automobilística fornecedora de duas gamas de produtos :

- Cabos de ignição (Bougicord),
- Sensores.

A Electricfil Industrie cresceu em torno da invenção do Bougicord, que permitiu a utilização de materiais magnéticos nos fios de ignição (que ligam a bobina as velas) dos motores à explosão.

Depois do Bougicord, a Electricfil Industrie desenvolveu a fabricação de sensores que captam as informações sobre o funcionamento do automóvel (mede velocidade, o deslocamento, as vibrações, a temperatura...).

A Electricfil Industrie é também uma empresa que possui meios de pesquisa e de desenvolvimento e possui know-how de trabalhos diversos que permitem abordar os principais domínios tecnológicos da indústria automobilística.

A título de exemplificação, a EFI domina as seguintes atividades:

- Moldagem de peças,
- Corte das peças de conexão,
- Extrusão de cabo,
- Usinagem de moldes,
- Pesquisa em efeitos anti-parasitas,
- Bobinagem de fios,
- Solda,
- Conexão de componentes elétricos.

A EFI é parceira das grandes construtoras automobilísticas mundiais, como a Peugeot (PSA), Renault, Ford, Volvo, Seat, Nissan, Saab, Honda, Opel, Volkswagen...

Também de grandes equipadoras como : Valéo, Lucas, ZF ...
Hoje, o faturamento da empresa é mais da metade proveniente de exportações.

2.1 SUA HISTÓRIA

A sociedade Electricfil é uma empresa familiar. Ela foi criada em 1936 por Johanny THOLLIN. A primeira atividade da empresa foi a fabricação de fios elétricos.

Em 1945, a empresa começou a fabricar fios para ferros de passar roupa. A partir de 1948, a Electricfil Industrie cresceu e fabricou 200 000 fios em cabo plástico.

Em seguida da publicação das primeiras leis sobre efeitos anti-parasitas dos veículos, a EFI decidiu se lançar sobre o mercado automotivo e mudou completamente de setor de atividade. Ela utilizou das propriedades da absorção dos materiais ferromagnéticos e criou a atividade de ignição.

Ele é hoje líder na fabricação de cabos de ignição com a marca Bougicord e se tornou uma grande especialista em sensores na Europa.
Desde 1975, a empresa se estabeleceu em Beynost.

A partir de 1977, o desenvolvimento do conceito de diagnóstico da ignição permitiu a produção dos primeiros sensores de controle e ajuste da ignição dos veículos.

No começo dos anos 80, a EFI investiu muito no controle motor. Ela adquiriu um perfeito domínio sobre os sensores de medição de grandezas físicas, tais quais velocidade, posição, deslocamento, vibração e temperatura.

O grupo ELECTRICFIL foi criado em 1981 para permitir a sociedade de se implantar fora da França.

1983 : 100 milhões de veículos na Europa são equipados com sensores magnéticos da Electricfil.

Nos anos 90, a Electricfil implanta filiais no exterior. Obtêm a certificação **ISO 9001** em 1994. Ela se implanta na Turquia, nos EUA, ...

2.2 SEUS PRODUTOS

2.2.1 OS CABOS

Ela se trata da atividade tradicional da Electricfil Industrie. Eles servem de base tecnológica para o desenvolvimento dos produtos de ignição e dos sensores. A Electricfil produz em média, da linha « Bougicord », 1250 km de cabos por mês.

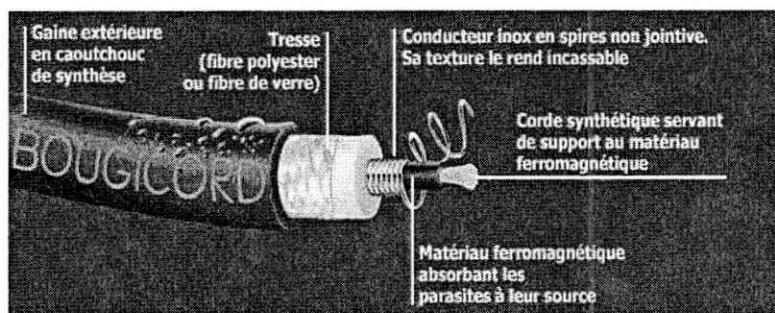


Figura 1 - As camadas do cabo de ignição.

2.2.2 OS CABOS DE IGNIÇÃO ANTI-PARASITAS

Eles permitem controlar a ignição, a tensão da bateria e a tensão nos bornes do sensor. A EFI é hoje um dos líderes no diagnóstico de ignição.

2.2.3 OS SENSORES

Existe vários tipos de sensores: sensores de velocidade para a caixa de marcha, sensores de posição para aplicação no motor, sensor de angulo, sensor de temperatura, sensor de posição codificado para a caixa de marcha.

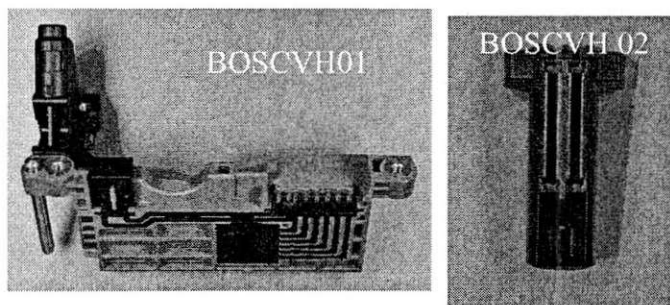


Figura 2 - Sensores da Bosch fabricados na Electricfil

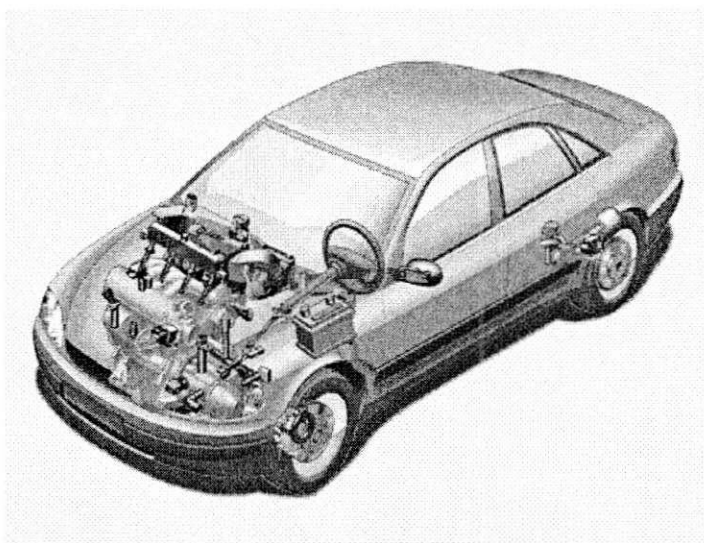


Figura 3 - Posição dos produtos EFI dentro de um veículo.

2.3 PRODUÇÃO

Produção Anual da Empresa:

- Sensores: 22 milhões de peças
- Allumage: 2.5 milhões de feixes de cabos;
700 000 cartuchos de ignição e bobinas de BOUGICORD®.

2.4 FATURAMENTO

Quando a atividade Allumage (produtos para ignição) é estável em relação a atividade Sensores (Capteurs), ela representa hoje 40% do faturamento global com um pouco menos de 30 milhões de euros no ano de 2000.

A atividade dos sensores não para de crescer desde a sua criação e é responsável pela maior parte do faturamento, cerca de 50 milhões de euros em 2000.

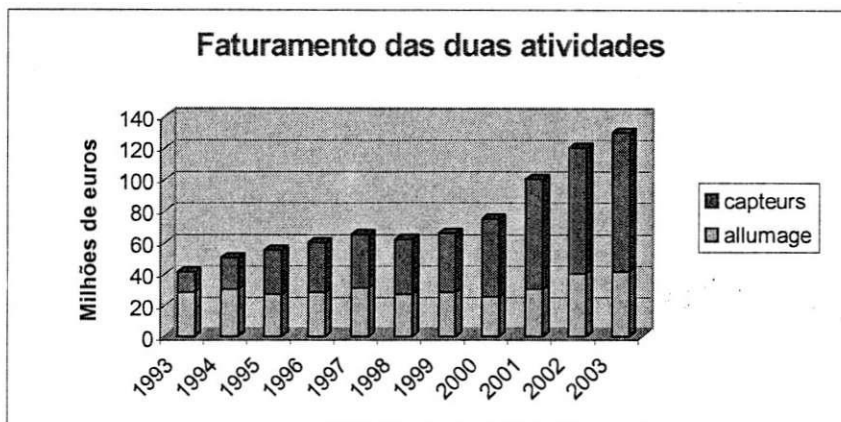


Figura 4 - Faturamento das duas atividades Capteurs (sensores) e Allumage (ignição)

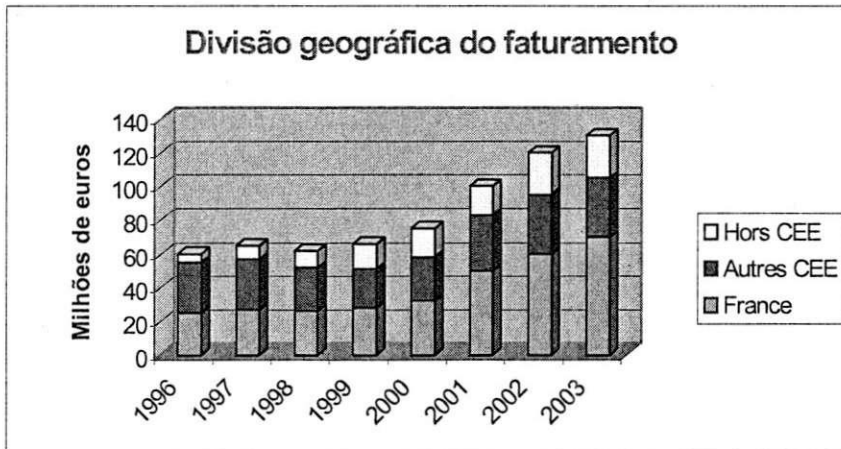


Figura 5 - Divisão geográfica do faturamento

2.5 PESQUISA E DESENVOLVIMENTO

Dentro da Electricfil, trabalhei dentro da equipe de P&D da atividade Sensor, sendo um estagiário de um dos chefes de projeto. A composição da equipe era a seguinte:

- ⌘ 1 diretor P&D
- ⌘ 4 responsáveis de aplicação
- ⌘ 8 chefes de projeto orientados
 - ☒ 8 Estagiários de engenharia
- ⌘ 3 engenheiros residentes
- ⌘ Bureau de estudos
 - ☒ 6 projetistas
- ⌘ Laboratórios de ensaios
 - ☒ 1 engenheiro de métodos de ensaios
 - ☒ 12 técnicos de ensaios
- ⌘ Industrialização
 - ☒ 3 engenheiros
 - ☒ 12 técnicos
- ⌘ Atelier Protótipos
 - ☒ 2 técnicos
 - ☒ 3 trabalhadores especializados

3 O SENSOR LVDT

O sensor de posição que nós utilizamos é um sensor indutivo à saturação magnética. Os principais elementos deste sensor são:

- Uma bobinagem primária, e duas bobinagens secundárias com um eixo cilíndrico de alta permeabilidade magnética e fraco campo de saturação.
- Um segundo eixo cilíndrico para melhorar o retorno do fluxo magnético.
- Um ímã móvel, suficientemente forte para saturar o primeiro eixo cilíndrico.

O esquema a seguir mostra o sensor:

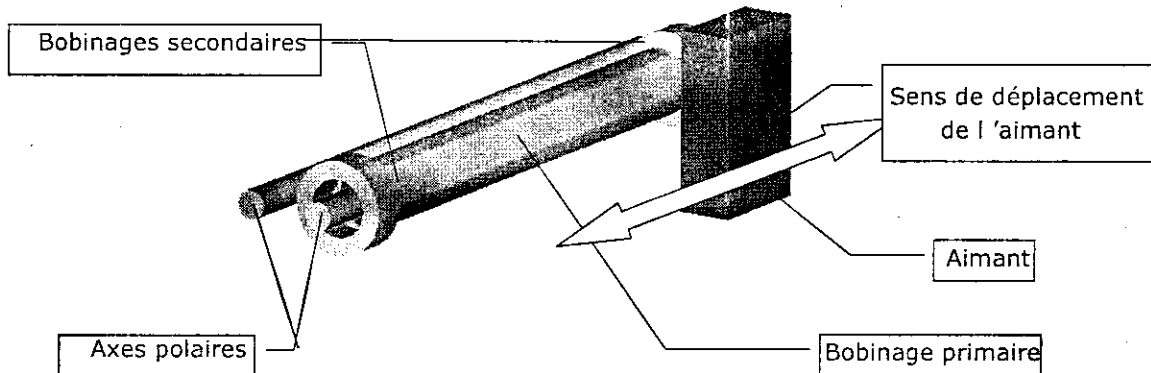


Figura 6 - Elementos do sensor LVDT estudado

O princípio de funcionamento do sensor LVDT consiste em alimentar a bobinagem primária com uma corrente alternada estabilizada, assim um campo magnético alternado é criado. O fluxo magnético resultante é dividido em duas partes pela zona de saturação do eixo cilíndrico. Cada parte do fluxo se concatena atravessando uma das bobinagens secundárias. A amplitude do fluxo magnético alternado visto por cada bobina secundária (e a tensão induzida nesta bobina) é proporcional ao número de espiras primarias entre a bobina secundária e a zona de saturação. Pela lei de Faraday, temos:

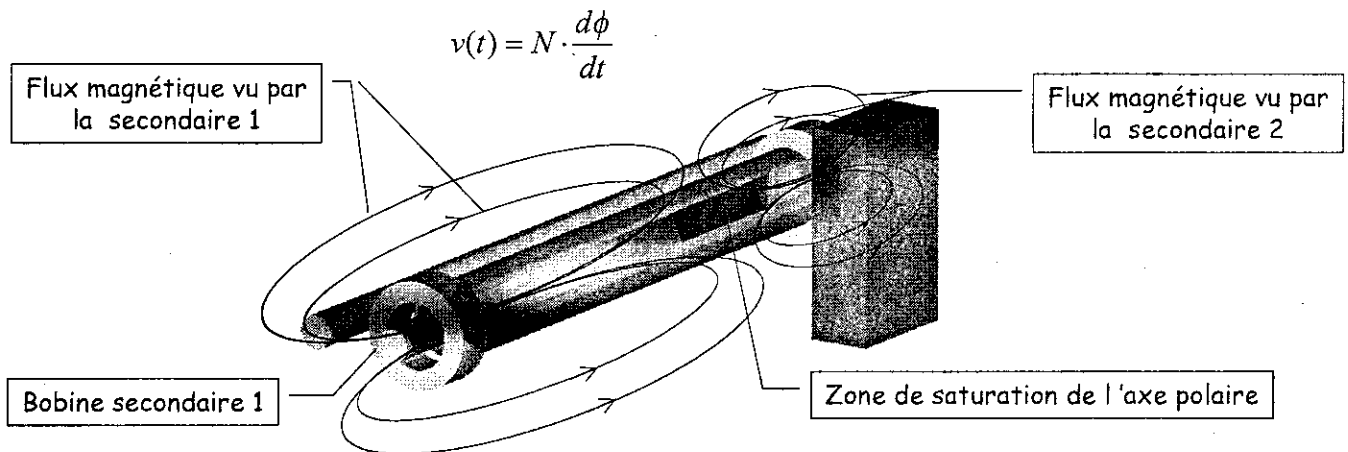


Figura 7 - Fluxo magnético e zona de saturação do sensor.

Sinais do Sensor LVDT (Tensão Eficaz)

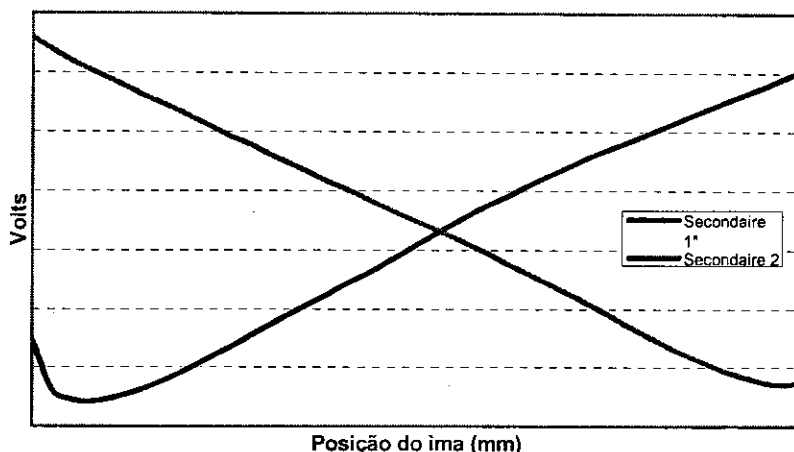


Figura 8 - Sinais do sensor em estudo.

As aplicações para o sensor LVDT são as seguintes:

- Caixa de marcha
 - Posição do garfo;
 - Posição da embreagem.

4 PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

Antes de apresentar os resultados, apresentarei a descrição e as montagens detalhadas dos ensaios. Assim, todos os ensaios realizados podem ser reproduzidos da mesma forma. Abaixo, descrevo o princípio experimental para cada parâmetro variável em questão.

4.1 DESCRIÇÃO DOS EXPERIMENTOS

O princípio do experimento de « **impedância** » consiste em medir a impedância da bobina primária do sensor, variando a posição do ímã em relação ao comprimento do sensor, et também variando o entreferro entre eles.

O princípio do experimento dos « **entreferrros** » consiste em medir a tensão das duas bobinas secundárias e a fator di/dt do sistema, variando a posição do ímã em relação ao comprimento do sensor e também variando o entreferro entre eles. Desta forma, podemos observar o funcionamento do nosso sensor utilizando diferentes entreferrros.

O princípio do experimento de « **temperatura** » consiste em medir a tensão das duas bobinas secundárias do sensor e a fator di/dt da carga indutiva e colocá-lo dentro de uma estufa, variando a posição do ímã em relação ao comprimento do sensor sob as temperaturas de -40°C , 25°C e 150°C .

O princípio do experimento de « **freqüência** » consiste em medir as tensões das bobinas primárias e secundárias, a fator di/dt e a corrente na bobina primária, variando a freqüência e a amplitude do sinal de entrada. Assim, podemos medir a potência do sensor e também medir o rendimento do sistema em relação à freqüência de funcionamento.

O princípio do experimento de « **defasagem** » consiste em medir a defasagem entre as tensões das bobinas secundárias e a corrente do primário do sensor, variando a posição do ímã em relação ao comprimento do sensor.

4.2 MONTAGENS

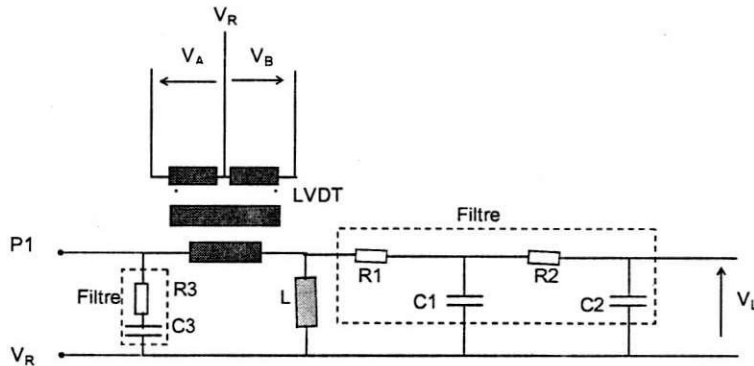


Figura 9 - Montagem

Onde P1 é a saída do circuito de estabilização de corrente
 V_R a referência do circuito (terra)
 V_A e V_B são as tensões das bobinas secundárias do sensor
 V_L é a tensão sobre a bobina L no circuito

Nós utilizamos estes filtros para eliminar as interferências de alta frequência nos sinais do circuito e que podem perturbar o sinal de saída. Os valores dos elementos do filtro são os seguintes: $R1=150\Omega$, $C1=100nF$, $R2=15k\Omega$, $C2=1nF$, $R3=10k\Omega$, $C3=2.2nF$. É um filtro passa-baixas e possui uma banda passante de 10kHz.

Se nós utilizarmos a montagem sempre desta maneira, nós teremos sempre o mesmo ponto de referência para o circuito, logo não teremos problema de ponto flutuante. Para o experimento de defasagem, nós utilizamos a seguinte montagem:

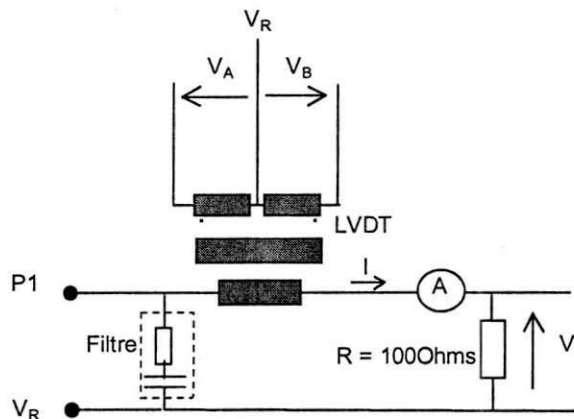
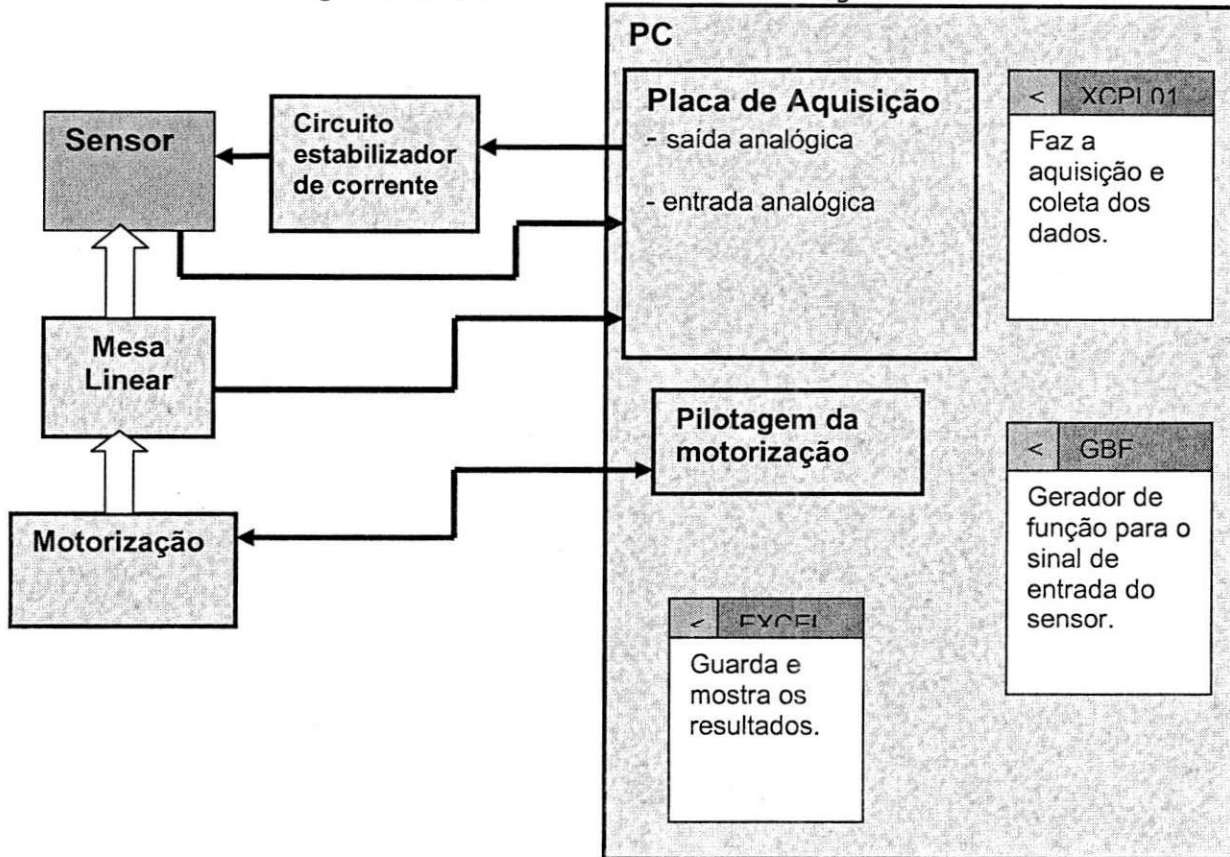


Figura 10 - Montagem com amperímetro.

Assim nós podemos medir a corrente do primário e também medir a tensão V_1 , que tem a mesma fase da corrente.

4.3 A BANCADA LINEAR

A grande parte de nossos experimentos, nós realizamos na bancada linear do laboratório de sensores. O diagrama de blocos desta bancada é a seguinte:



A bancada é composta por:

- Um PC
- Placa de aquisição da National Instruments (aquisição dos dados);
- Placa de pilotagem da mesa linear;
- Mesa linear;
- Circuito estabilizador de corrente;
- Uma alimentação (alimenta o circuito estabilizador de corrente).

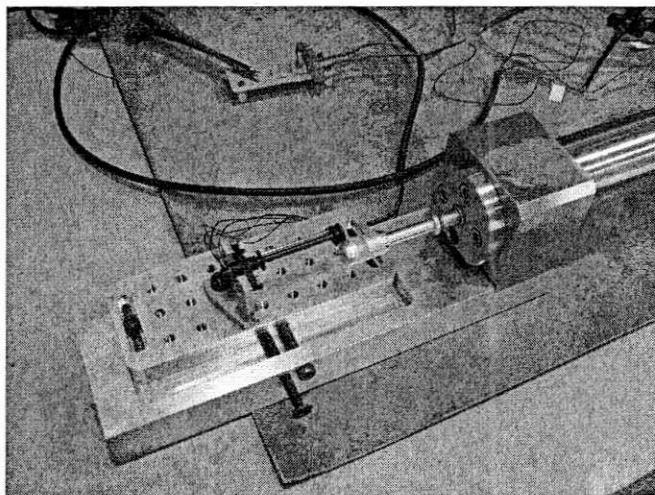


Figura 11 - Mesa linear com o sensor

5 TRATAMENTO DO SINAL

Para o tratamento do sinal, nós utilizamos os métodos **diferencial**, **ratiométrico** e **di/dt**. Nós os utilizamos da seguinte forma:

Diferencial:

$$\text{Diff} = (V_A - V_B)$$

Ratiométrico:

$$\text{Ratio} = (V_A - V_B)/(V_A + V_B)$$

di/dt :

$$\ll \text{di/dt} \gg = (V_A - V_B)/V_L$$

Nós utilizamos o tratamento di/dt porque o sinal de saída do sensor varia proporcionalmente com a derivada da corrente, assim podendo utilizar este como outro fator de tratamento do sinal.

Nós medimos o di/dt através de uma indutância, assim nós podemos medir sua tensão, como podemos ver na montagem do circuito. A tensão sobre a bobina L é :

$$V_L = R_L \cdot i + L \cdot \frac{di}{dt}$$

$$\text{Mas} \rightarrow R_L \cdot i \ll L \cdot \frac{di}{dt}$$

$$\text{Logo} \rightarrow V_L \cong L \cdot \frac{di}{dt}$$

Nós variamos três parâmetros do sensor: o entreferro, a amplitude e a frequência do sinal de entrada. Os resultados foram os seguintes:

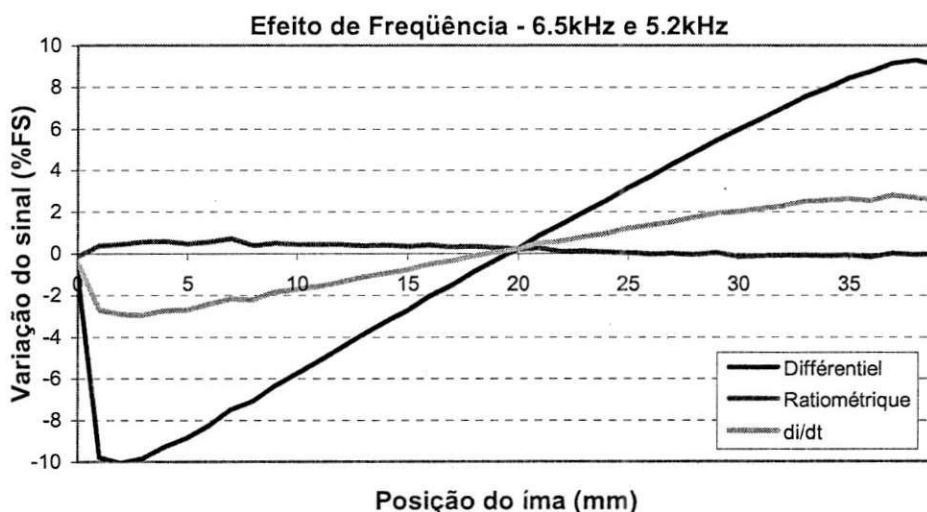


Figura 12 - Efeito de frequência para cada tratamento do sinal

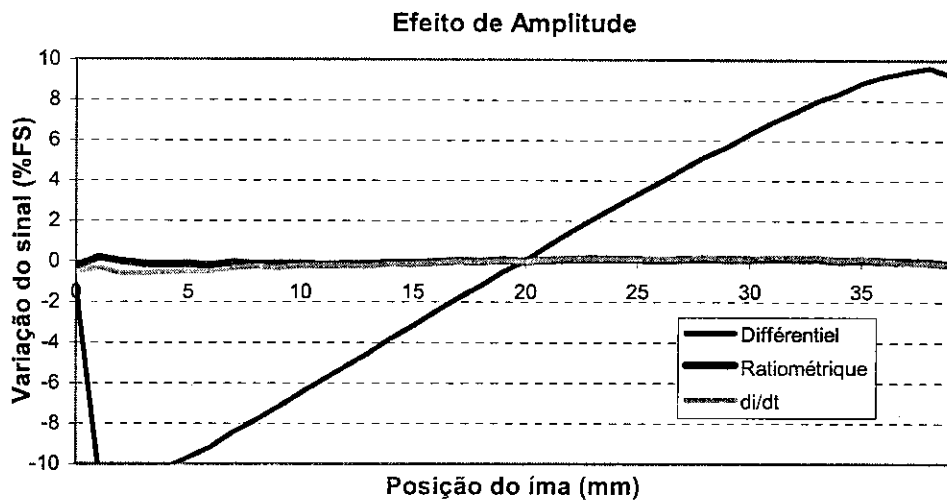


Figura 13 - Efeito de amplitude para cada tratamento do sinal

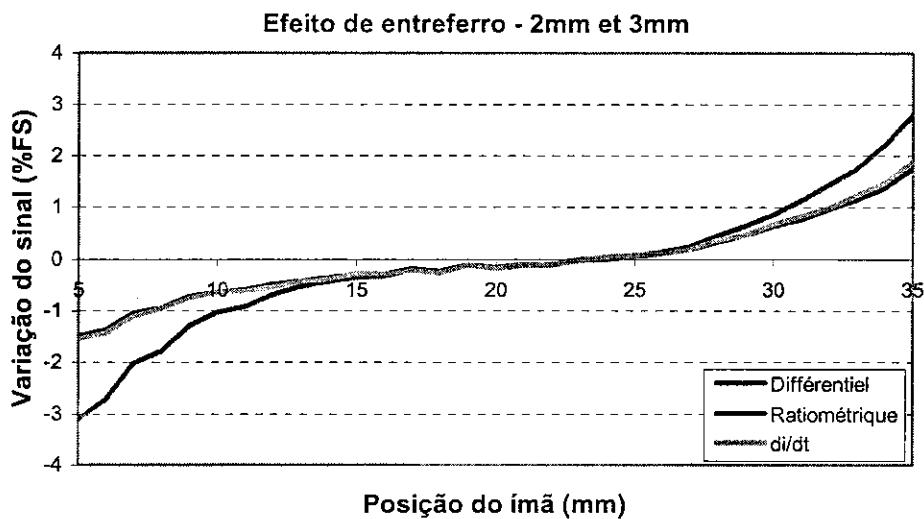


Figura 14 - Efeito de entreferro para cada tratamento do sinal

Então, podemos concluir que:

- Diferencial
 - ↳ Estável à variação de entreferro
- Ratiométrico
 - ↳ Estável a variação de amplitude e frequência
- di/dt
 - ↳ Estável a variação de amplitude e entreferro

Escolha ⇒ Ratiométrico

As derivadas térmicas causam variação de frequência e de amplitude do sinal e nós não temos a necessidade de colocar mais componentes no circuito (di/dt).

6 SENSORES UTILIZADOS

Durante os experimentos, utilizamos 3 diferentes tipos de sensor :

- **Sensor 40mm**

O sensor utilizado tem um comprimento de 40mm, fio de 0.08mm de espessura com 720 espiras sobre a bobina primária e 220 espiras sobre as bobinas secundárias.

- **Sensor 50mm V.1**

O sensor utilizado tem um comprimento de 50mm, fio de 0.08mm de espessura com 802 espiras na bobina primária e 220 espiras nas bobinas secundárias.

- **Sensor 50mm V.2**

O sensor utilizado tem 50mm de comprimento, fio de 0.1mm de espessura com 600 espiras sobre a bobina primária e 110 espiras sobre as bobinas secundárias.

Nós podemos ver o desenho do sensor nos Anexos.

7 IMPEDÂNCIAS

Material utilizado:

- Um PC;
- Mesa linear;
- Placa de pilotagem da mesa linear;
- Programa Pilotage Manuel.VI (pilotagem manual da mesa linear);
- Ohmímetro Fluke PM6304;
- Ímã de NdFeB ($B_r > 1.16$ T, $H_{cb} > 865$ KA/m, $H_{cj} > 1670$ KA/m, $BH > 255$ kJ/m³) ;
Dimensões : 17mm d. ext, 10mm d. int., 4mm de espessura.
- O ímã se desloca em paralelo ao comprimento do sensor, com os eixos a mesma altura (ver foto).

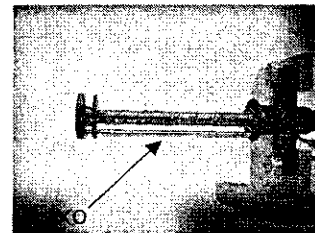
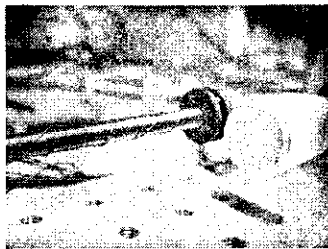


Figura 15 - Posição do ímã e do eixo de realimentação em relação ao sensor

7.1 SENSOR 40MM

Condição de ensaio:

- Frequência do ohmímetro: 5kHz ;
- Entreferrós* utilizados: 0mm, 1,45mm e 2,45mm ;
- Tamanho dos eixos polares: 40mm ;
- Eixo de realimentação em baixo do sensor (ver figura 7.2).

* Os valores dos entreferrós são mostrados em relação a parte externa, a 5,75mm do centro do sensor.

A impedância do sensor em função da posição do ímã é mostrada nos gráficos seguintes:

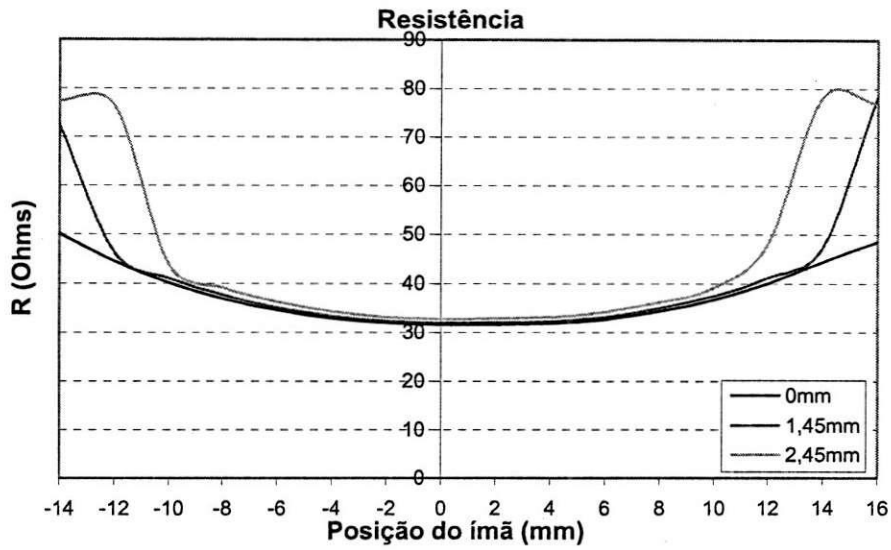


Figura 16 - Resistência da bobina primária do sensor em função da posição do ímã

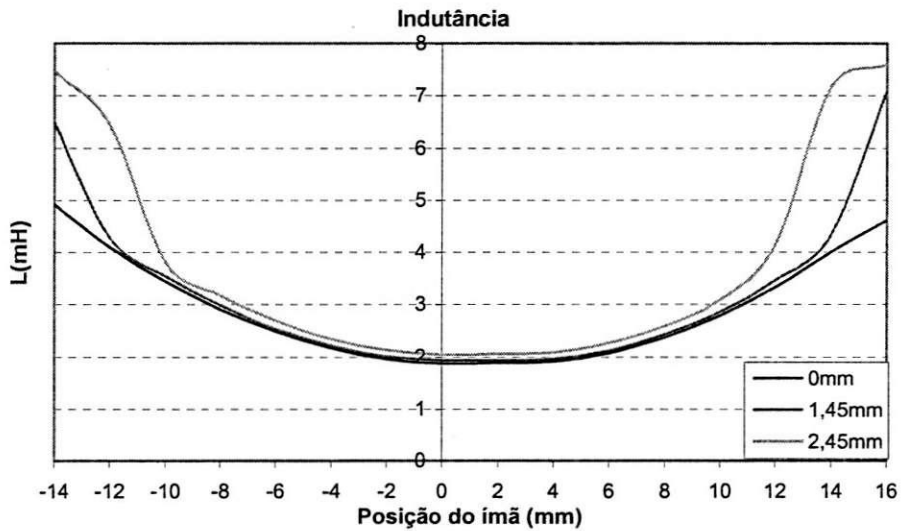


Figura 17 - Indutância da bobina primária do sensor em função da posição do ímã

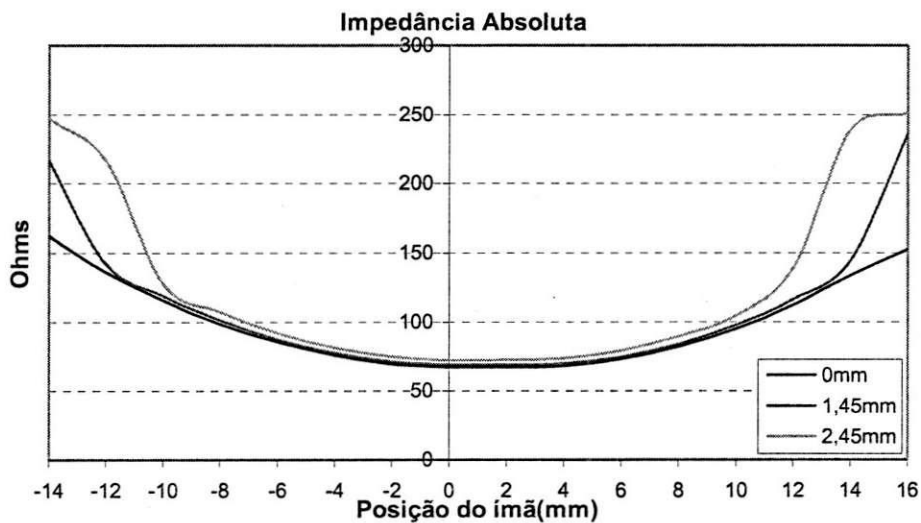


Figura 18 - Impedância da bobina primária do sensor em função da posição do ímã

Os gráficos seguintes mostram as medições de impedância do sensor de 40mm de comprimento, mas agora com o eixo de realimentação posicionado atrás do sensor:

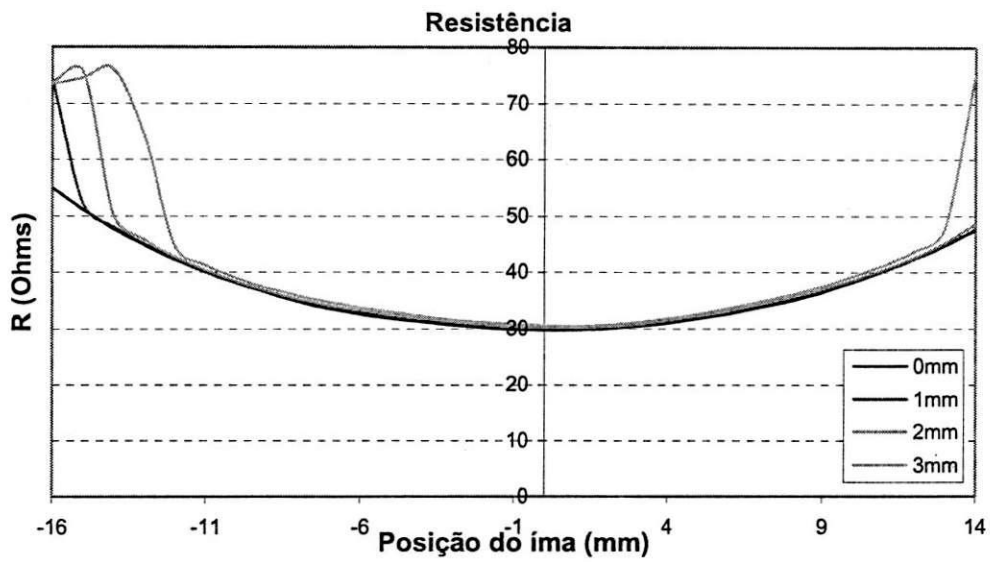


Figura 19 - Resistência da bobina primária do sensor em função da posição do ímã

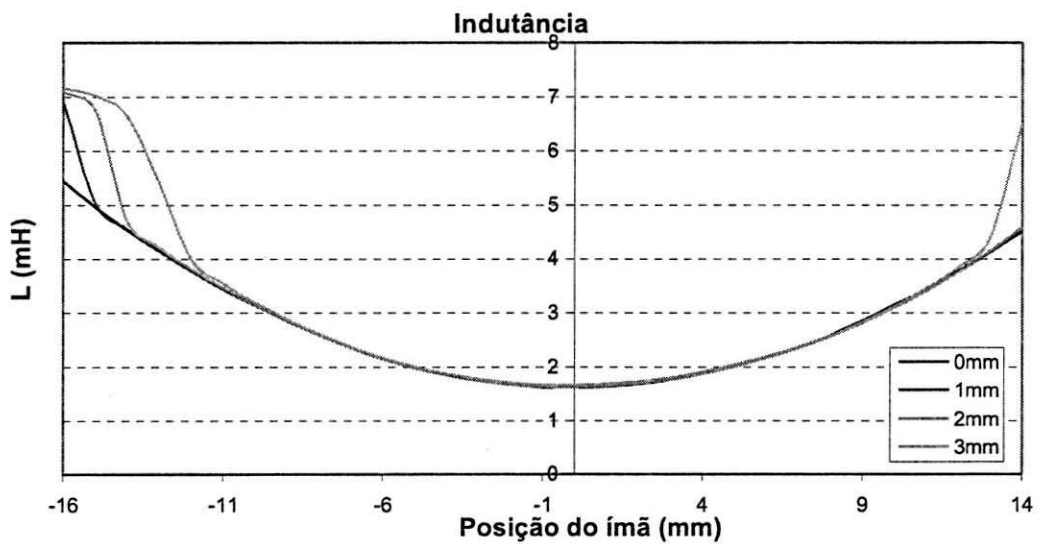


Figura 20 - Indutância da bobina primária do sensor em função da posição do ímã

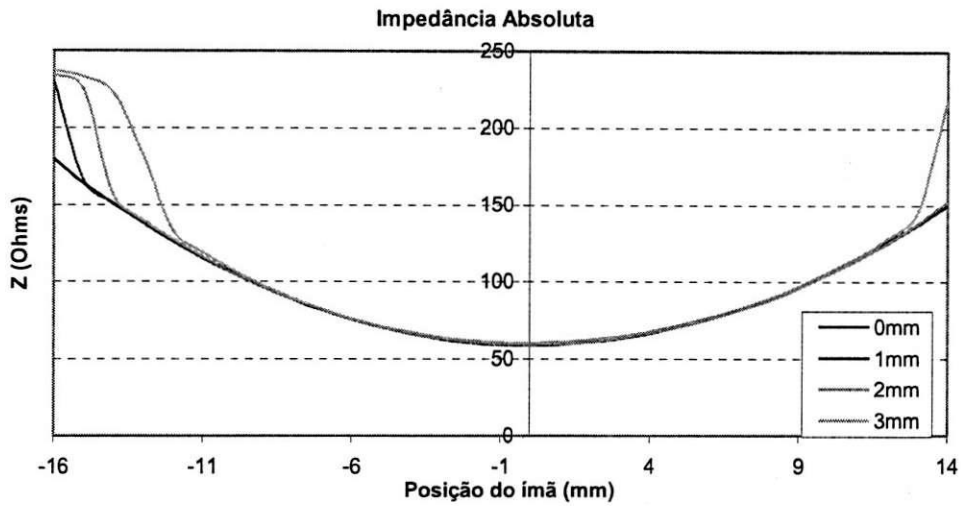


Figura 21 - Impedância da bobina primária do sensor em função da posição do ímã

7.2 SENSOR 50MM V.1

Condição de ensaio:

- Frequência do ohmímetro: 5kHz ;
- Entreferras utilizados: 0mm, 1mm, 2mm, e 3mm ;
- Tamanho dos eixos polares: 50mm ;
- Eixo de realimentação em baixo do sensor.

Nós caracterizamos a impedância deste sensor em função da posição do ímã e utilizando os entreferras. Assim, obtivemos os gráficos seguintes:

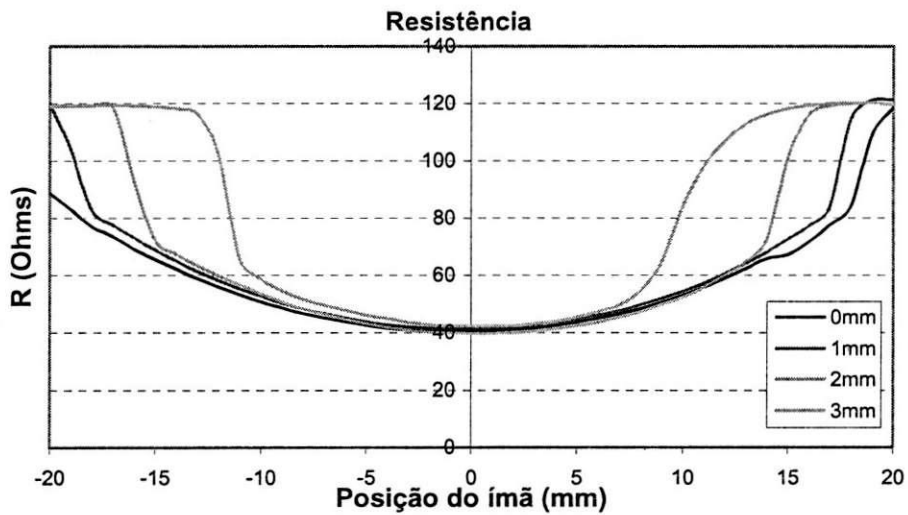


Figura 22 - Resistência da bobina primária do sensor em função da posição do ímã

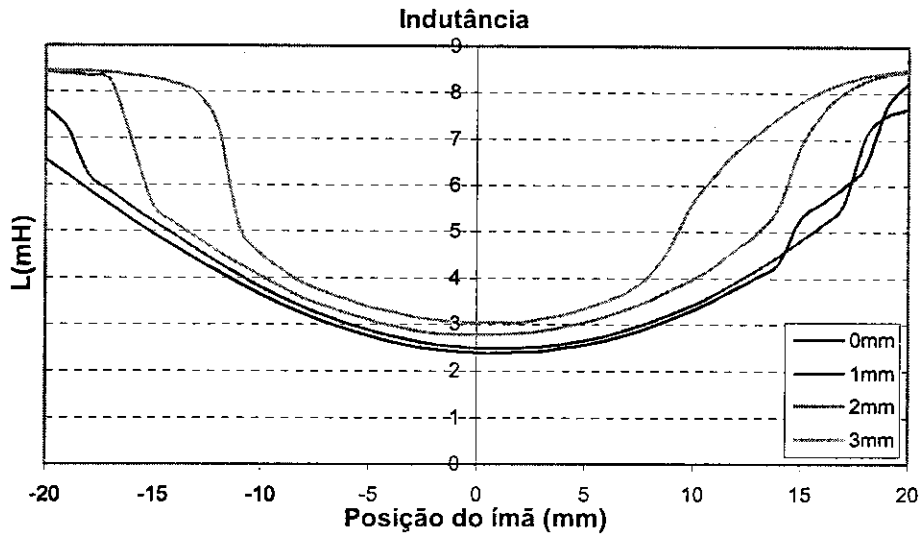


Figura 23 - Indutância da bobina primária do sensor em função da posição do ímã

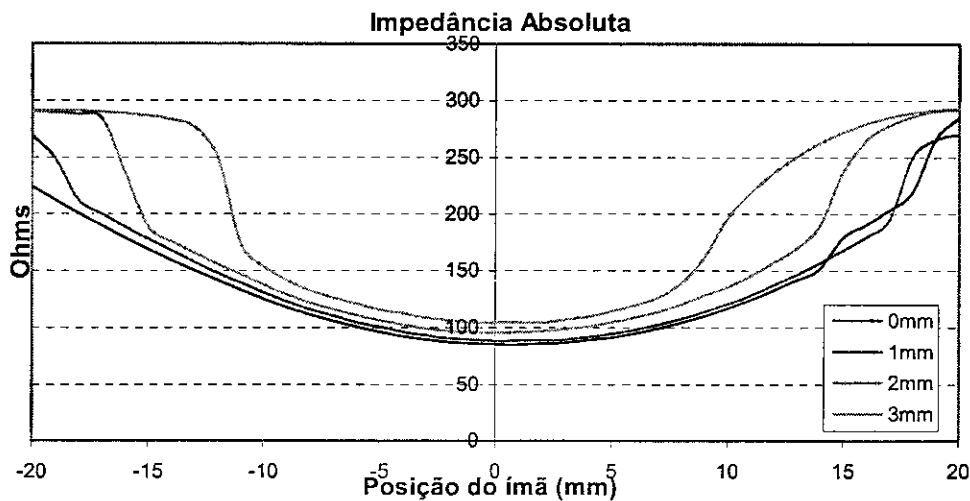


Figura 24 - Impedância da bobina primária do sensor em função da posição do ímã

7.3 SENSOR 50MM V.2

Condição de ensaio:

- Frequência do ohmímetro: 5kHz ;
- Entreferros utilizados: 0mm, 1mm, 2mm, e 3mm ;
- Tamanho dos eixos polares: 50mm ;
- Eixo de realimentação atrás do sensor (ver fig. 7.12).

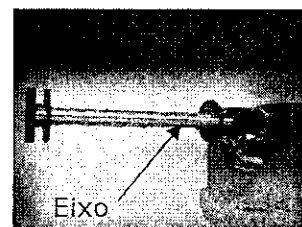


Figura 25 - Posição do eixo de realimentação

Os gráficos seguintes mostram as curvas de resistência, indutância e impedância absoluta deste sensor :

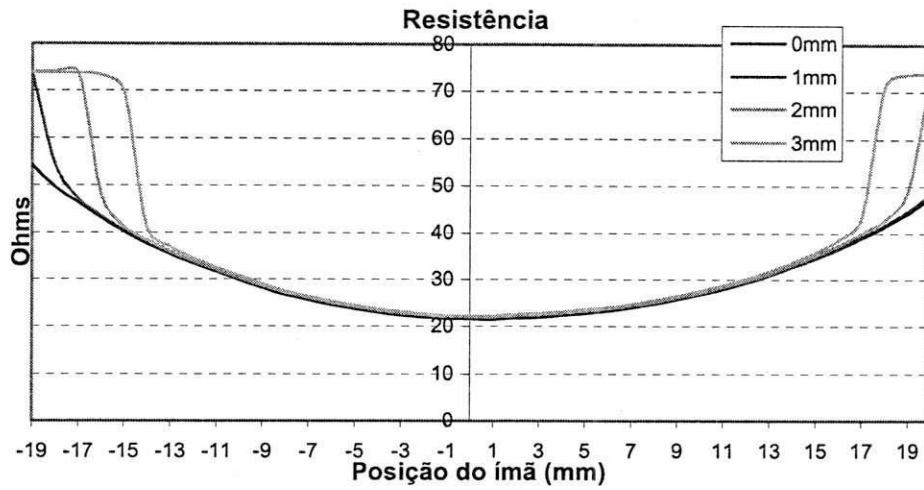


Figura 26 - Resistência da bobina primária do sensor em função da posição do ímã

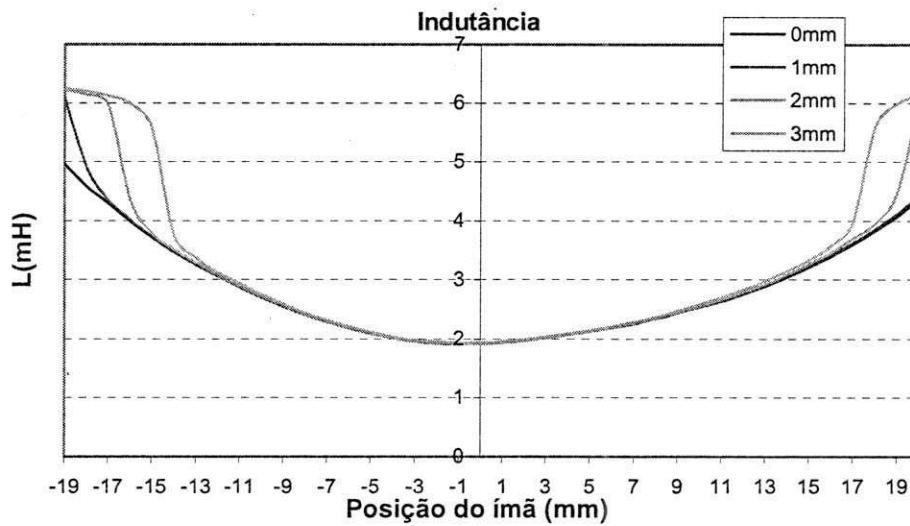


Figura 27 - Indutância da bobina primária do sensor em função da posição do ímã

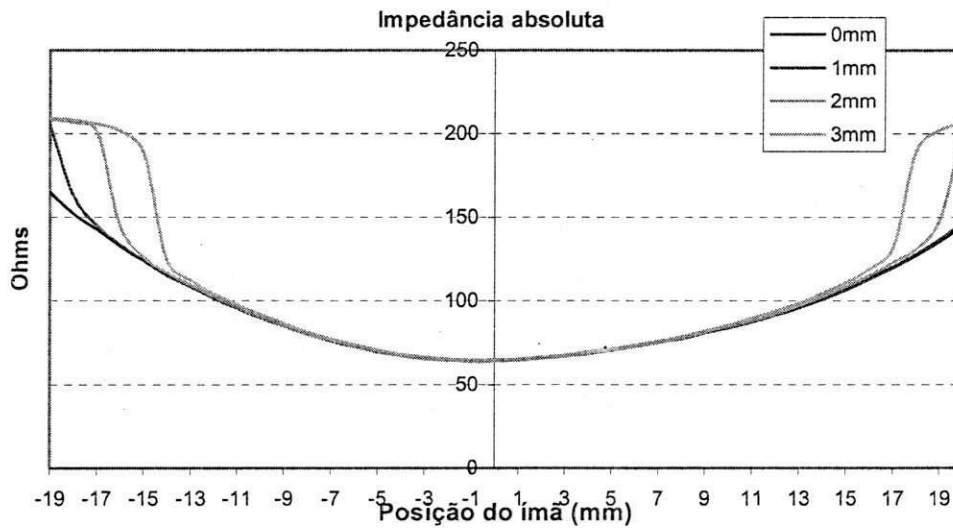


Figura 28 - Impedância da bobina primária do sensor em função da posição do ímã

Podemos observar que as curvas de impedância têm um comportamento similar a um polinômio de 2ª ordem. Então, nós aproximamos a curva de impedância por uma função deste tipo, com um entreferro de 0mm, achando a seguinte equação : $y=0,2326x^2-0,5562x+63,885$. Assim que descobrimos esta curva de tendência, criamos o gráfico de erro desta função em relação a cada curva de impedância com diferentes entreferros:

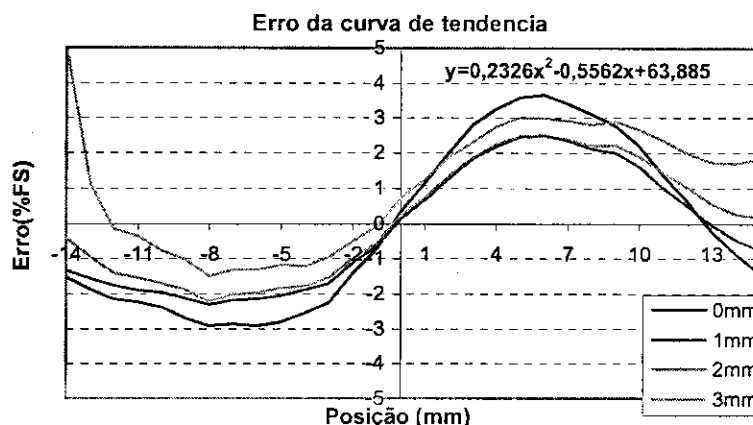


Figura 29 - Erro da impedância da bobina primária do sensor em função da posição do ímã

Vemos que o erro não passa de +/-3,5%.

7.4 CONCLUSÃO

Vemos através deste experimento que as curvas de resistência, indutâncias e de impedância absoluta dos sensores tendem a uma função polinomial de 2ª ordem, pois a impedância varia com o quadrado do número de espiras não saturadas da bobina primária do sensor. Observamos também que quando utilizamos o eixo de realimentação em baixo do sensor, existe uma variação da impedância em entreferros de valores diferentes, dentro da zona monótona. Essa variação desaparece quando utilizamos o eixo de realimentação atrás do sensor, devido à melhora do fluxo magnético. Vemos que em todos os gráficos de impedância que no fim do curso do ímã, há uma grande variação de impedância, pois o ímã não chega mais a saturar a bobina primária, e quanto maior o entreferro, maior é essa variação.

8 FREQUÊNCIA

Material Utilizado :

- Circuito de estabilização de corrente MG** ;
- GBF HP33120A e PHILIPS PM5132;
- Osciloscópio Tektronix TDS210;
- Multímetro Metrix MX53;
- Gerador de Tensão Contínua CIRCUITMATE 300SX.

Observamos o comportamento dos sinais de saída do sensor e a potência injetada no primário do sensor (medimos a tensão e a corrente do primário) para poder saber seu rendimento em função da frequência.

$$\text{Rendimento} = \frac{P_{\text{secundário}}}{P_{\text{primário}}}$$

$$P_{\text{primário}} = V_{\text{primário}} \cdot I_{\text{primário}}$$

** O circuito de estabilização de corrente era alimentado com 10V.

8.1 SENSOR 40MM

Condições de ensaio:

- Utilizamos o GBF HP33120A;
- Entreferro: 1mm;
- Tamanho dos eixos polares: 40mm ;
- Eixo de realimentação em baixo do sensor;
- Ímã na posição +10mm;
- Corrente senoidal de 3.7mA (0.5V de amplitude) e 7.5mA (1V de amplitude) eficaz no primário do sensor, à 5kHz.

Os gráficos obtidos foram os seguintes:

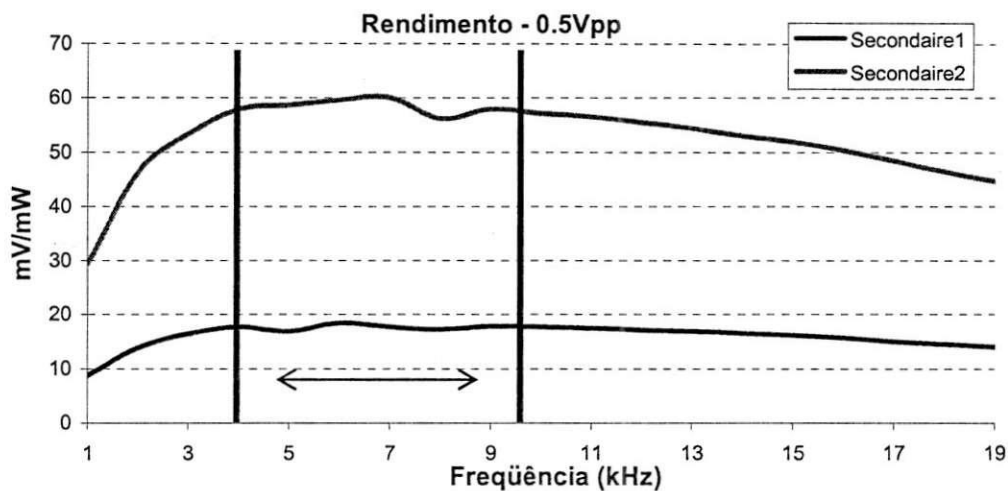


Figura 30 - Rendimento do sensor para diferentes freqüências, em cada secundário, para um sinal de entrada com 0,5V de amplitude.

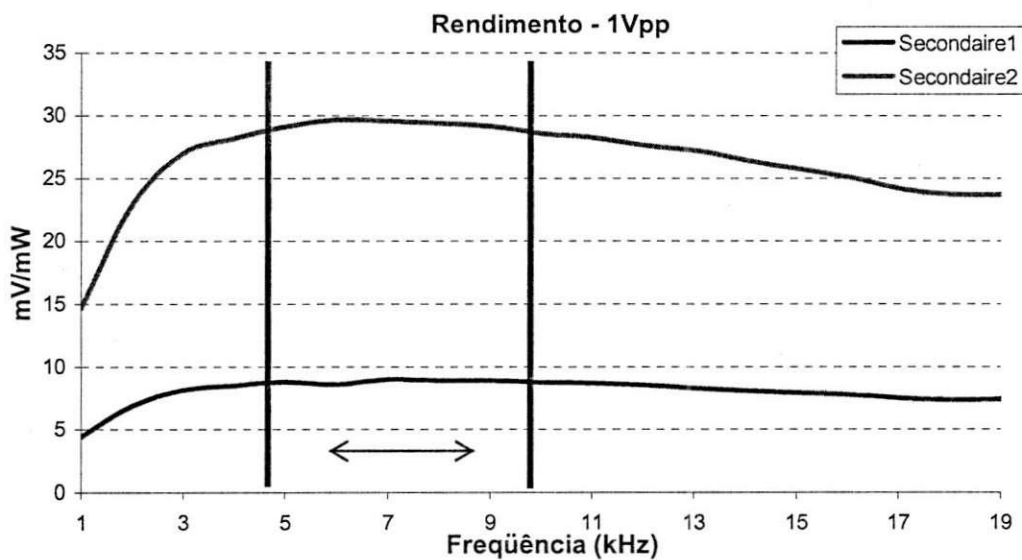


Figura 31 - Rendimento do sensor para diferentes freqüências, em cada secundário, para um sinal de entrada com 1V de amplitude.

8.2 SENSOR DE 50MM V.1

Condições de ensaio:

- Utilizamos GBF PHILIPS PM5132;
- Entreferro: 1mm ;
- Tamanho dos eixos polares: 50mm;
- Eixo de realimentação em baixo do sensor;
- Ímã na posição -10mm;
- Corrente senoidal de 3.7mA (0.5V de amplitude) e 7.5mA (1V de amplitude) eficaz no primário do sensor, à 5kHz.

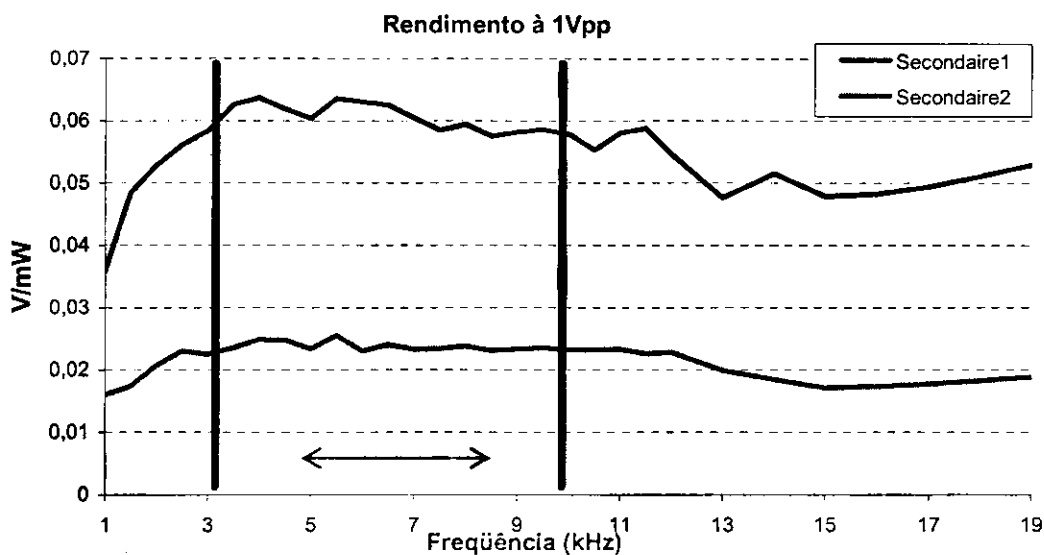


Figura 32 - Rendimento do sensor para diferentes frequências, em cada secundário, para um sinal de entrada com 1V de amplitude.

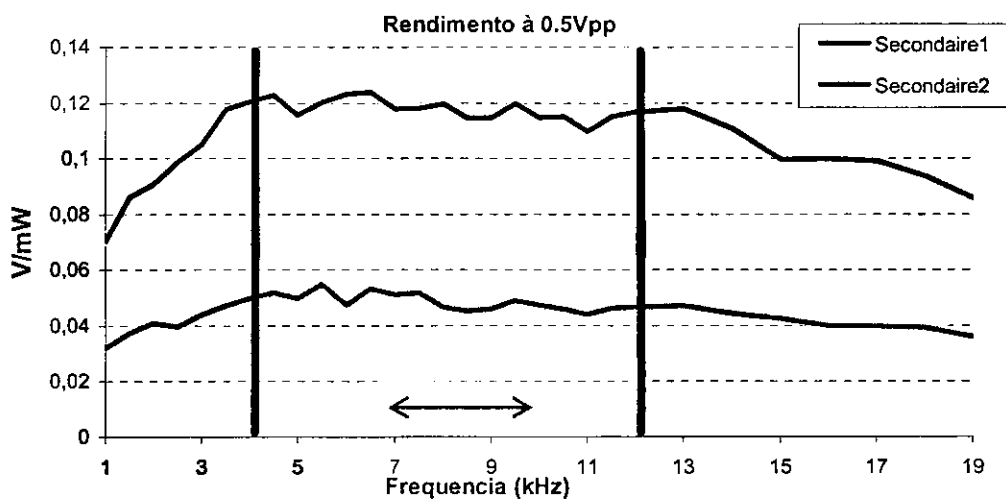


Figura 33 - Rendimento do sensor para diferentes frequências, em cada secundário, para um sinal de entrada com 0,5V de amplitude.

8.3 SENSOR 50MM V.2

Condições de ensaio :

- Utilizamos o GBF HP33120A ;
- Entreferro: 1mm ;
- Tamanho dos eixos polares : 50mm ;
- Eixo de realimentação em baixo do sensor ;
- Ímã na posição -10mm ;
- Corrente senoidal de 3.7mA (0.5V de amplitude) e 7.3mA (1V de amplitude) eficaz no primário do sensor, à 5kHz.

Os gráfico obtidos foram os seguintes :

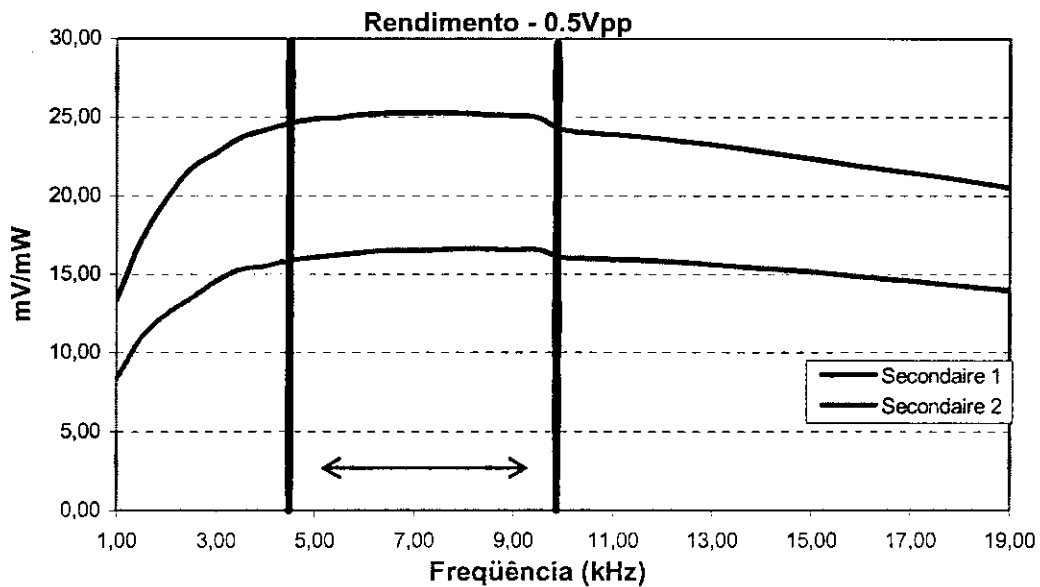


Figura 34 - Rendimento do sensor para diferentes frequências, em cada secundário, para um sinal de entrada com 0,5V de amplitude.

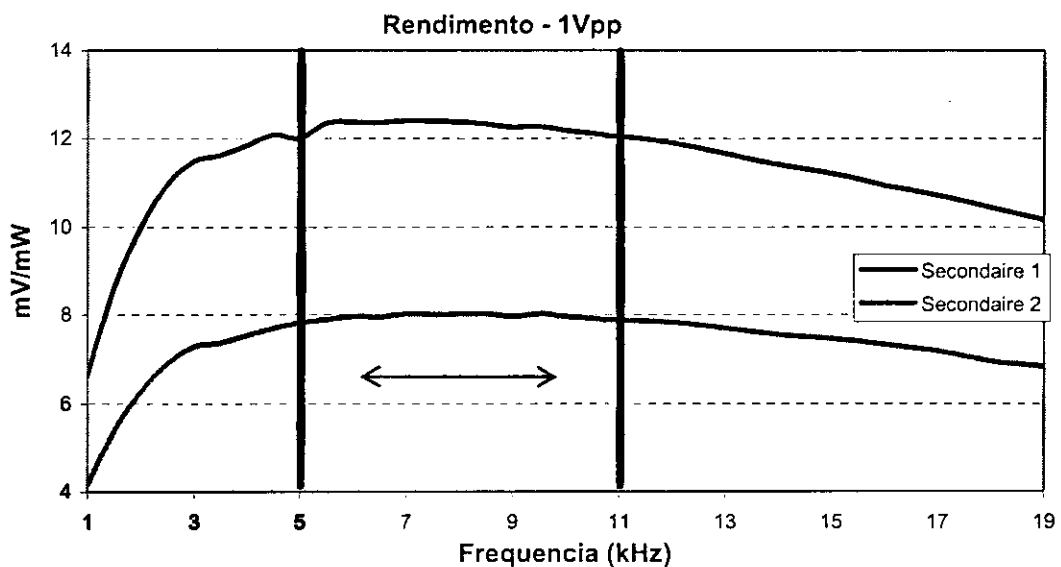


Figura 35 - Rendimento do sensor para diferentes frequências, em cada secundário, para um sinal de entrada com 1V de amplitude.

8.4 CONCLUSÃO

Podemos ver que nas frequências mais baixas não temos um bom rendimento por causa das perdas no cobre, pois devemos injetar uma corrente maior para obter o mesmo sinal. Mas, quando aumentamos um pouco a frequência, vemos que aumentamos o rendimento pois as perdas no cobre diminuem. Em contrapartida, começamos a aumentar as correntes de Foucault, então o rendimento fica constante até 10kHz. À partir desta frequência, as perdas aumentam, pois as perdas associadas as correntes de Foucault aumentam muito. Logo, vemos que podemos utilizar um sinal de entrada com a frequência entre 5kHz e 10kHz, e teremos quase o mesmo rendimento nesta faixa de operação para todos os sensores que utilizamos.

9 GEOMETRIA

Nós fizemos experimentos utilizando diversos tipos e tamanhos de eixos polares, também com o eixo de realimentação em diferentes posições em relação ao sensor. Também utilizamos eixos polares de 40mm, 45mm e 50mm, e tentamos fazer medidas com eixos de realimentação nas posição em baixo e atrás do sensor, como podemos ver nas figuras seguintes :



Figura 36 - Posições do eixo de realimentação em relação ao sensor

9.1 ENTREFERROS E LINEARIDADES DAS CURVAS DOS SENSORES

Neste experimento, observamos o comportamento do sensor em função da posição do ímã, utilizando diferentes entreferos. Após a coleta dos dados, observamos também a não-linearidade dos sinais do sensor.

9.1.1 SENSOR 50MM V.1

Condições de ensaio :

- Eixos polares cilíndricos de 50mm ;
- Corrente senoidal no primário: 6mA eficaz ;
- Frequência : 5kHz ;
- Entreferros: 0mm, 1mm, 2mm e 3mm ;
- Posição do eixo de realimentação : em baixo do sensor.

Os gráficos obtidos foram os seguintes :

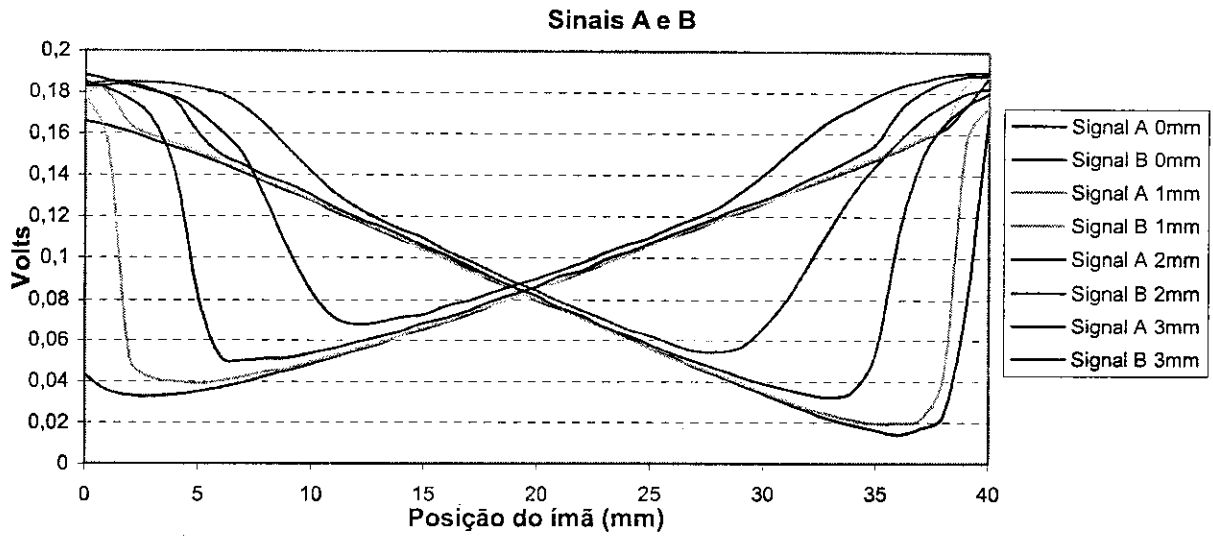


Figura 37 - Sinais brutos do sensor para posição do eixo de realimentação em baixo do sensor

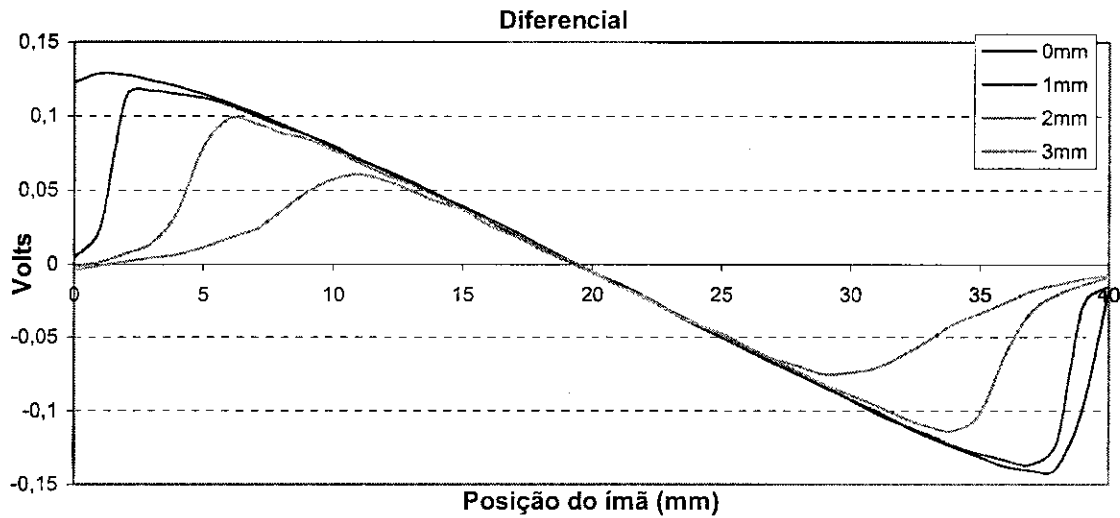


Figura 38 - Sinal diferencial do sensor para posição do eixo de realimentação em baixo do sensor

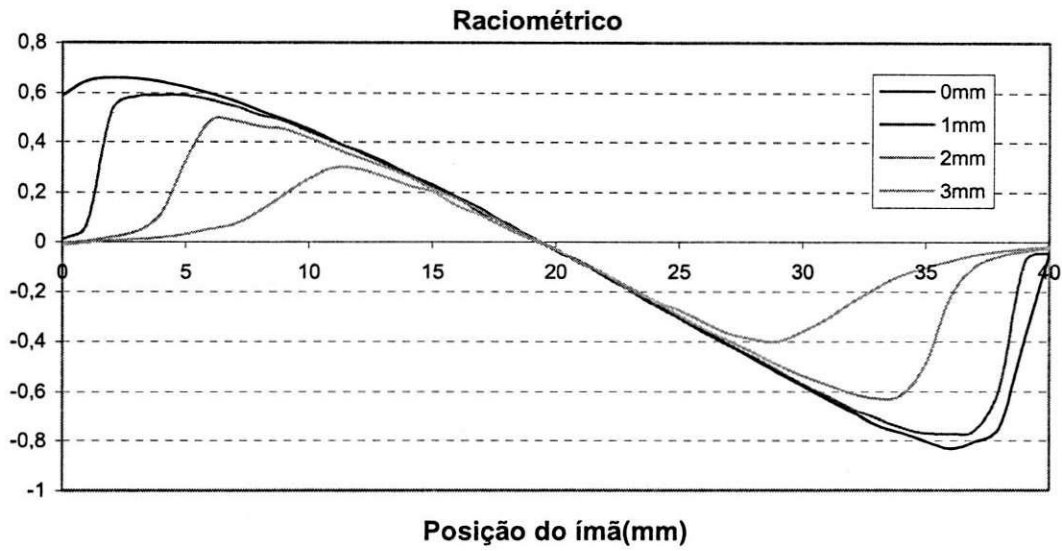


Figura 39 - Sinal raciométrico do sensor para posição do eixo de realimentação em baixo do sensor

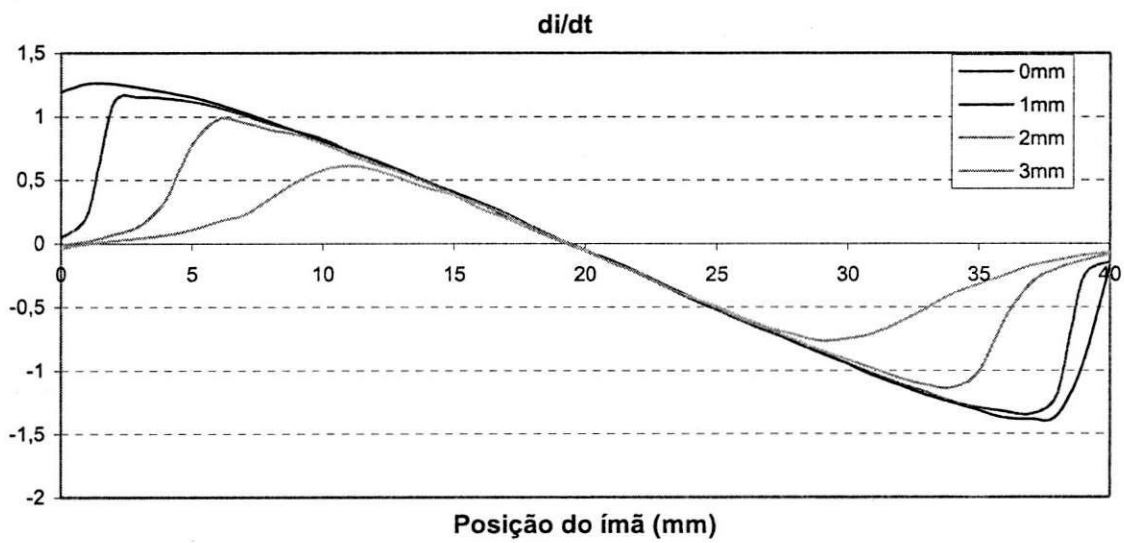


Figura 40 - Sinal di/dt do sensor para posição do eixo de realimentação em baixo do sensor

Podemos ver o efeito dos entreferros pelos seguintes gráficos:

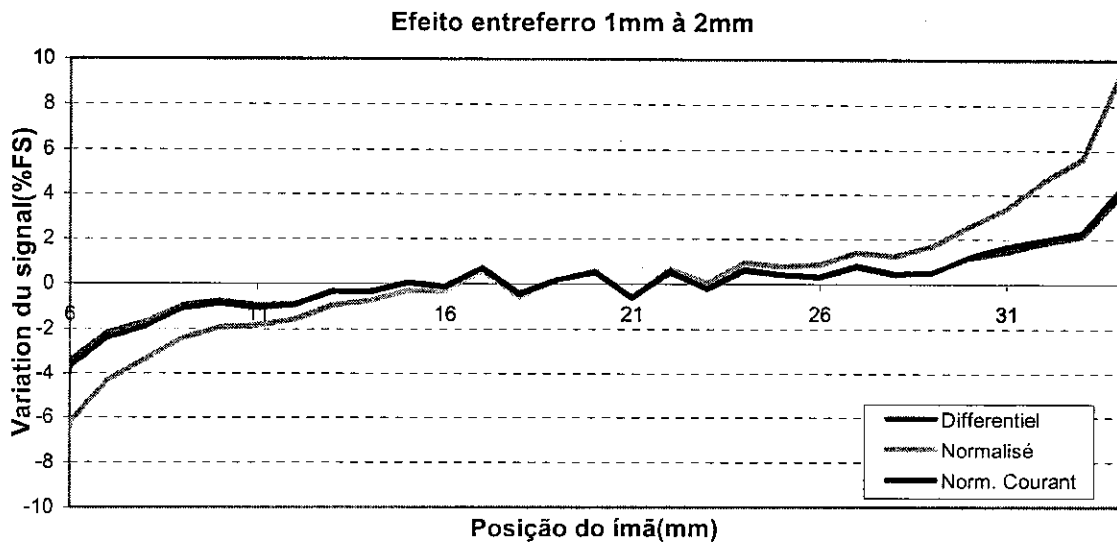


Figura 41 - Efeito de entreferro do sensor para posição do eixo de realimentação em baixo do sensor

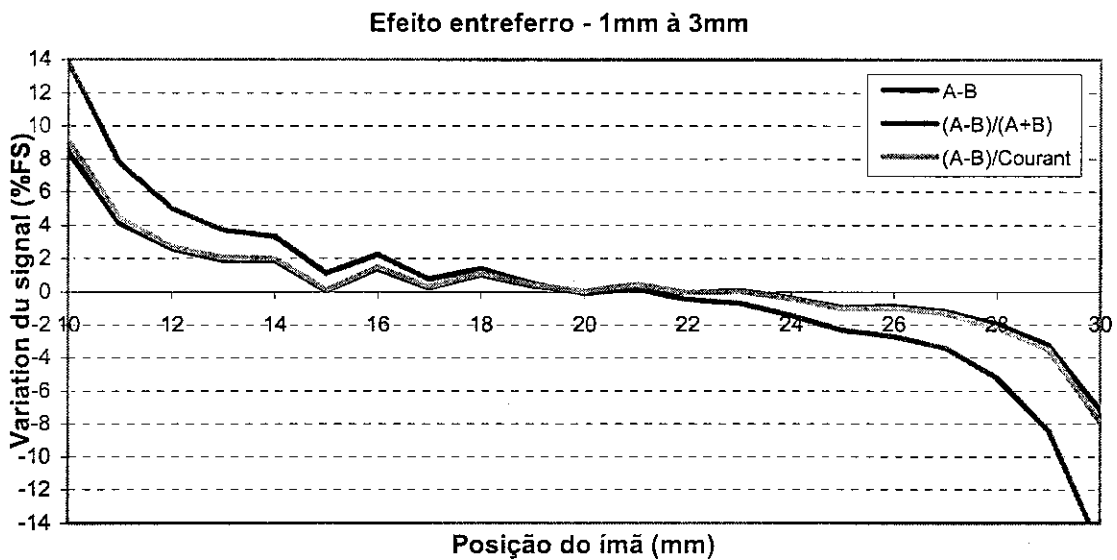


Figura 42 - Efeito de entreferro do sensor para posição do eixo de realimentação em baixo do sensor

Vemos que o efeito do entreferro é maior nas extremidades do sensor, por causa dos efeitos de borda. Então, o ímã não chega a saturar a bobina primária do sensor nestas regiões. Vemos também que temos mais erros (efeito de entreferro) no tratamento ratiométrico.

Fizemos uma aproximação da zona monótona por uma função linear, para os sinais com 2mm de entreferro sobre 32mm da zona monótona, e calculamos a não-linearidade destes sinais:

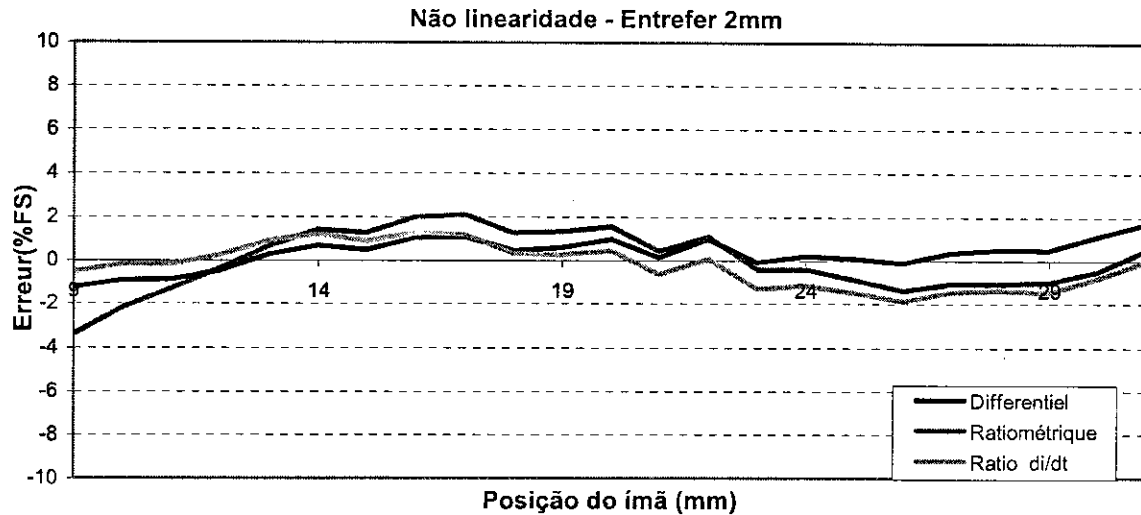


Figura 43 - Erro de não linearidade do sensor para posição do eixo de realimentação em baixo do sensor

Observando o gráfico, vemos que o tratamento diferencial possui menos erros (+/-1%). Nos outros tratamentos, temos aproximadamente +/-2% de erro.

9.1.2 SENSOR 50MM V.2

Condições de ensaio :

- Eixos polares cilíndricos de 50mm ;
- Corrente senoidal no primário : 8mA eficaz ;
- Frequência : 6.5kHz ;
- Entreferos : 0mm, 1mm, 2mm, 3mm e 4mm ;
- Posição do eixo de realimentação : Atrás do sensor.

Pudemos observar o comportamento do sensor em função da posição do ímã e dos entreferos. Sobre os gráficos seguintes, nós podemos ver os sinais brutos e os sinais do tratamento diferencial, ratiométrico e di/dt :

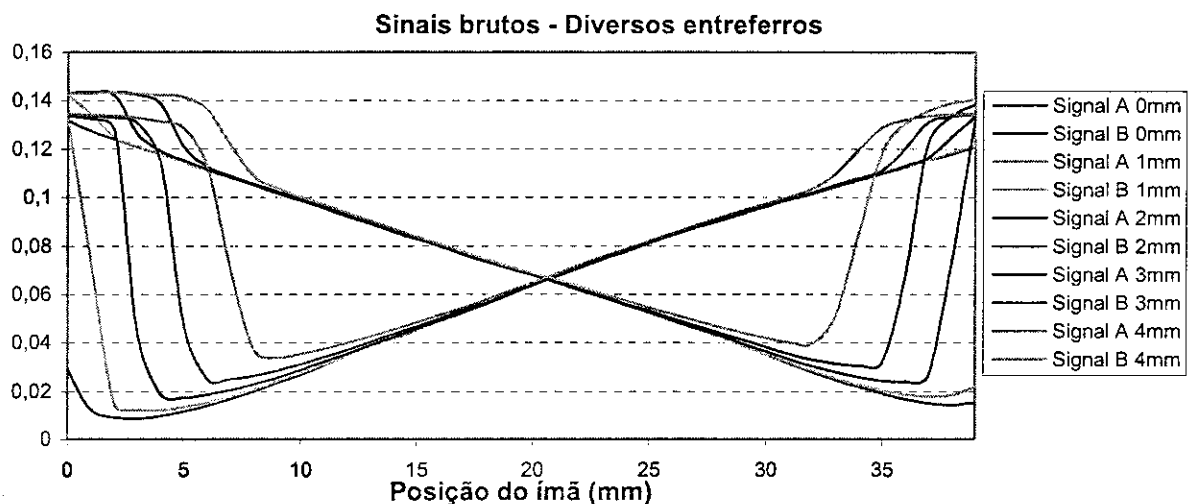


Figura 44 - Sinal bruto do sensor para posição do eixo de realimentação atrás do sensor

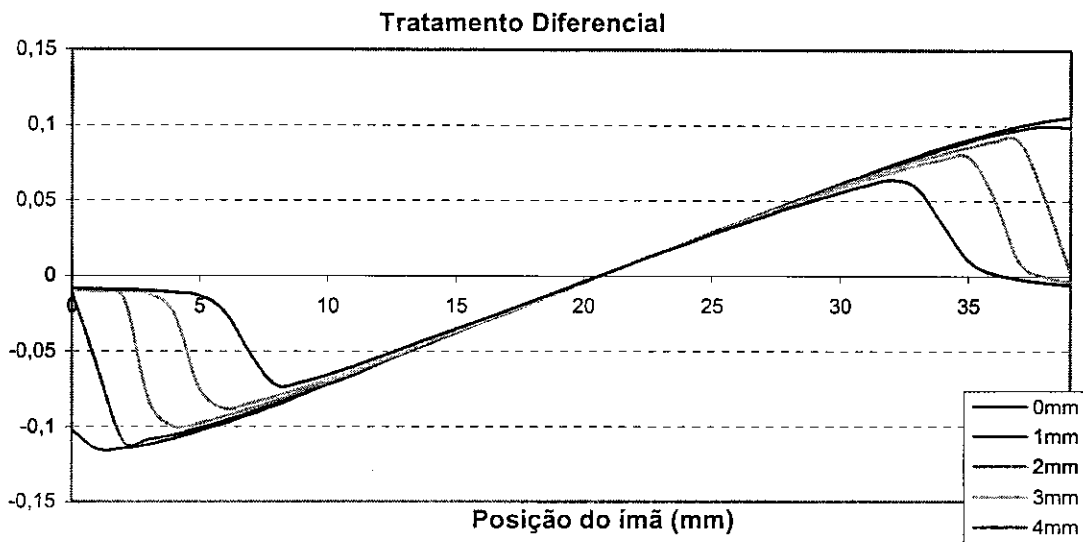


Figura 45 - Sinal diferencial do sensor para posição do eixo de realimentação atrás do sensor

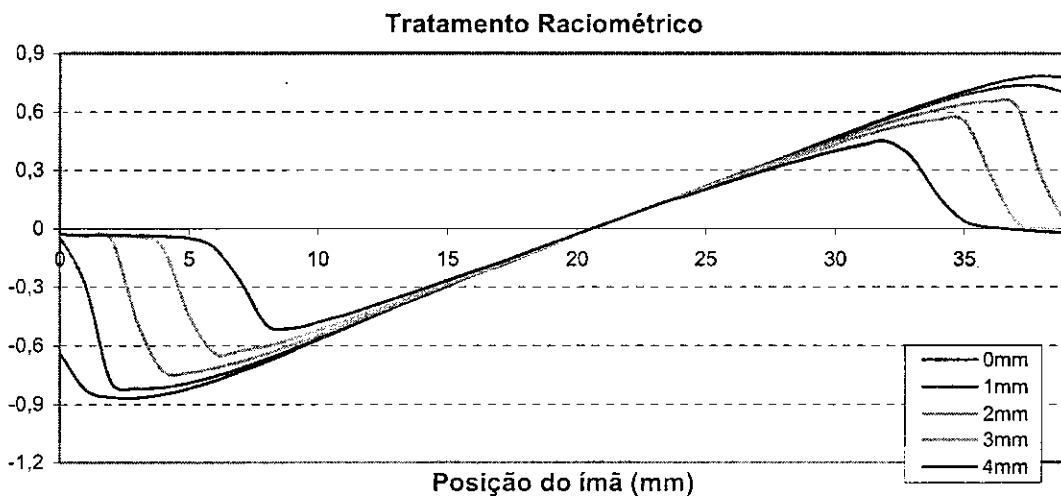


Figura 46 - Sinal raciométrico do sensor para posição do eixo de realimentação atrás do sensor

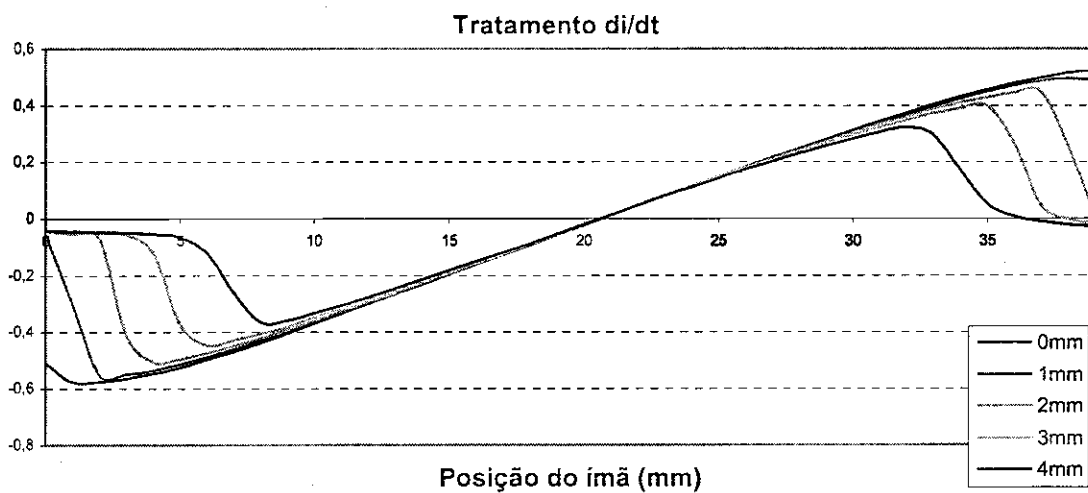


Figura 47 - Sinal di/dt do sensor para posição do eixo de realimentação atrás do sensor

Vemos que o comprimento da zona monótona é sempre maior que 26mm nos entreferros de 0mm, 1mm, 2mm e 3mm. A tabela abaixo resume os comprimentos:

Tabela 1 - Comprimento da Zona Monótona

Entreferro (mm)	Comprimento da zona monótona (mm)		
	Diferencial	Raciométrica	di/dt
0	38	35	37
1	36	33	36
2	33	31	33
3	29	28	29
4	24	23	24

Após a coleta dos dados, podemos ver o efeito do entreferro. Observamos a variação do sinal entre os entreferros de 1mm e 2mm, e também de 1mm e 3mm. Os resultados foram os seguintes :

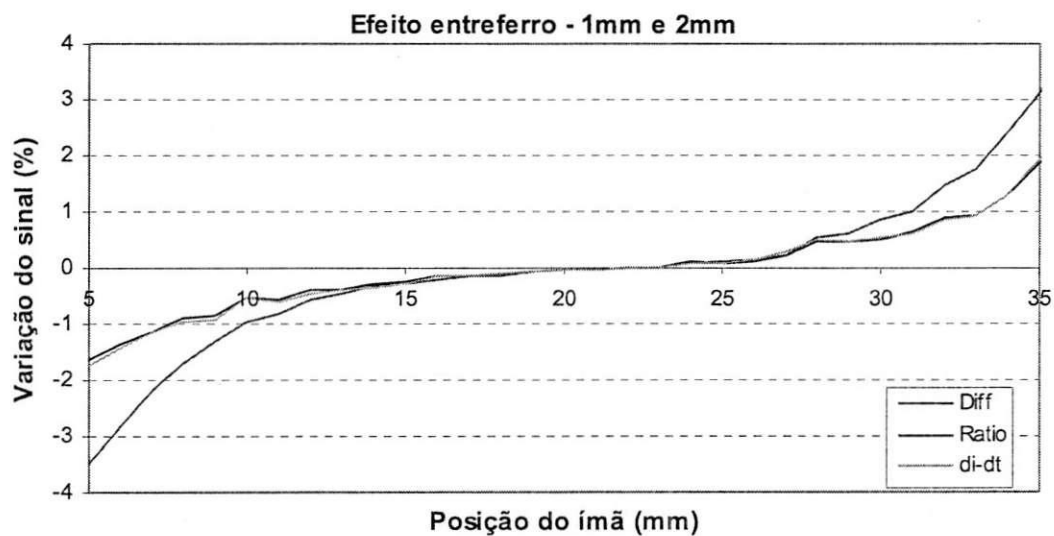


Figura 48 - Efeito de entreferro do sensor para posição do eixo de realimentação atrás do sensor

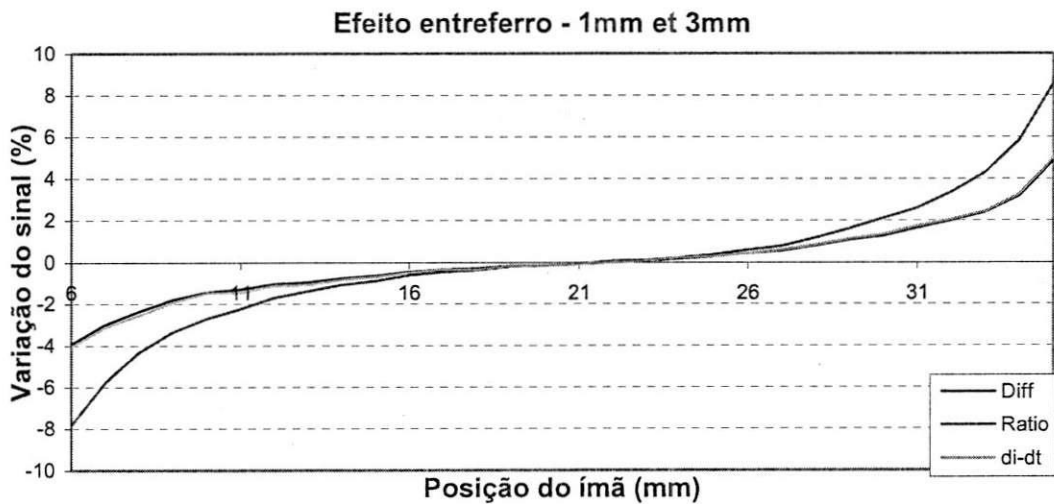


Figura 49 - Efeito de entreferro do sensor para posição do eixo de realimentação atrás do sensor

Observamos que o tratamento diferencial e o di/dt possuem menos efeito de entreferro, como no outro ensaio como sensor 50mm V.1.

Fizemos uma aproximação da zona monótona do tratamento do sinal com um entreferro de 3mm por uma curva de tendência linear. Assim, podemos ver a não-linearidade sobre 28mm da zona monótona deste sensor :

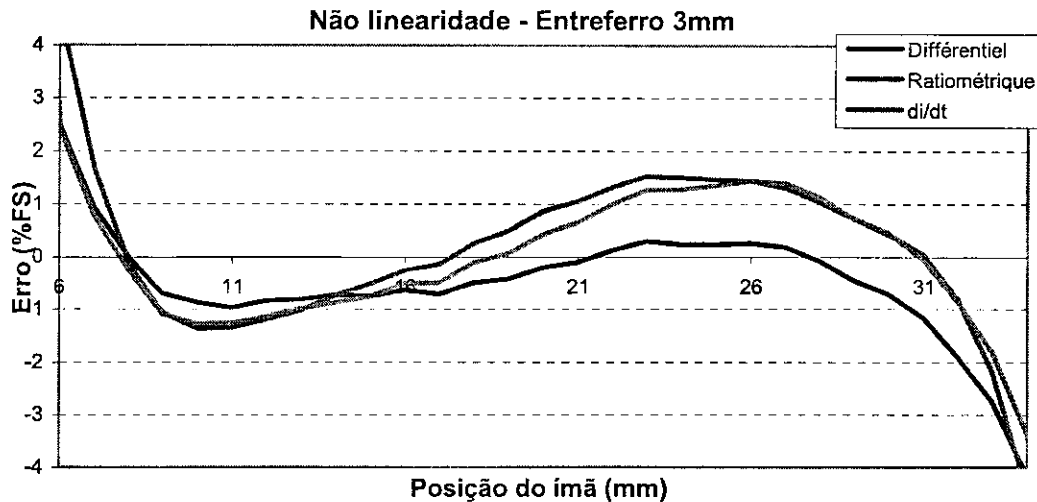


Figura 50 - Não linearidade dos sinais do sensor para posição do eixo de realimentação atrás do sensor

Quando observamos a não-linearidade, vemos que o tratamento diferencial possui menos erros (+/-1%). Dentro da zona monótona, temos um erro máximo de +/-1,5%.

9.2 POSIÇÃO DO EIXO DE REALIMENTAÇÃO

Condições de ensaio para o sensor 50mm V.1:

- Eixos polares cilíndricos de 50mm ;
- Corrente senoidal primária : 6mA eficaz ;
- Frequência : 5kHz ;
- Entreferros : 1mm e 3mm;
- Posição do eixo de realimentação : Em baixo e atrás do sensor.

Vemos a diferença entre a utilização do eixo polar em duas posições diferentes nos gráficos seguintes, utilizando entreferro de 1mm e 3mm :

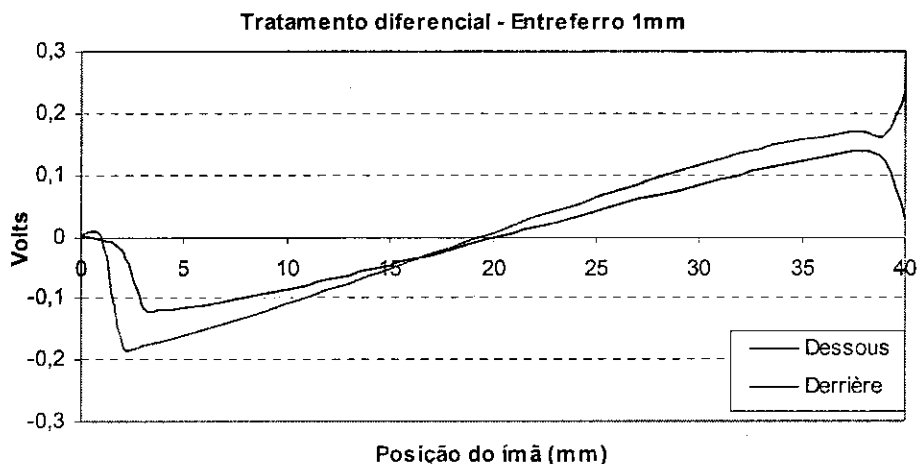


Figura 51 - Comparação entre os sinais diferenciais com o eixo de realimentação em baixo (dessous) e atrás (derrière) do sensor para o entreferro de 1mm.

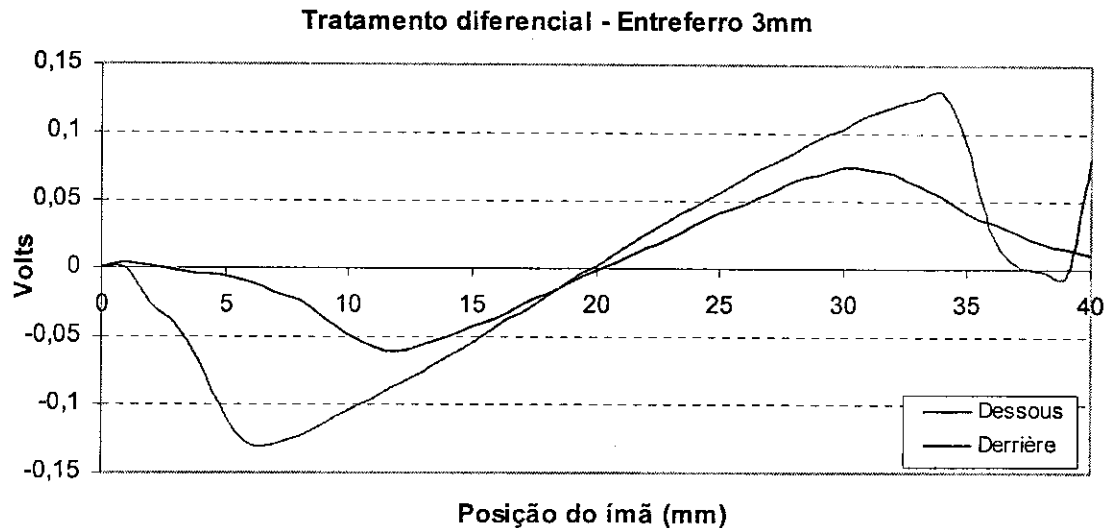


Figura 52 - Comparação entre os sinais diferenciais com o eixo de realimentação em baixo (dessous) e atrás (derrière) do sensor para o entreferro de 3mm.

Vemos que o desempenho do sensor quando utilizamos o eixo de realimentação atrás é bem melhor do que quando o utilizamos em baixo. Vemos nos gráficos que a zona monótona é maior quando utilizamos o eixo de realimentação atrás do sensor, pois quando ele está em baixo, ele está mais próximo do ímã, reduzindo a eficácia do ímã. Consequentemente, não saturamos mais a bobina primária com um entreferro maior e no fim do comprimento útil do sensor.

Lembramos que não temos a mesma inclinação para os dois sensores, pois a corrente de excitação não eram as mesmas.

9.3 BOBINAS MAIS ESPAÇADAS

Condições de ensaio para o sensor 40mm:

- Eixo polar cilíndrico de 50mm e eixo de realimentação de 40mm;
- Corrente senoidal no primário : 7.5mA eficaz ;
- Frequência : 5kHz ;
- Entreferos : 0mm, 1mm, 2mm e 3mm;
- Posição do eixo de realimentação : atrás do sensor.

Condições de ensaio para o sensor de 50mm V.2 :

- Eixos polares cilíndricos de 50mm ;
- Corrente senoidal no primário : 7mA eficaz ;
- Frequência : 6.5kHz ;
- Entreferos : 0mm, 1mm, 2mm e 3mm;
- Posição do eixo de realimentação : atrás do sensor.

Depois do experimento, nós vemos que nós utilizamos todo o comprimento útil do sensor de 40 mm. Então, o comprimento de sua zona monótona foi limitada porque nós não podemos ir mais longe que 30mm. Observamos bem sobre os gráficos seguintes que as zonas monótonas dos dois sensores para o entreferro de 3mm são idênticas. Nós podemos ver também que sobre o tratamento do sinal, o ratiométrico e o diferencial possuem menos influência de entreferro sobre a variação do sinal.

Comparação entre sensores de 40mm e 50mm - Sinal diferencial

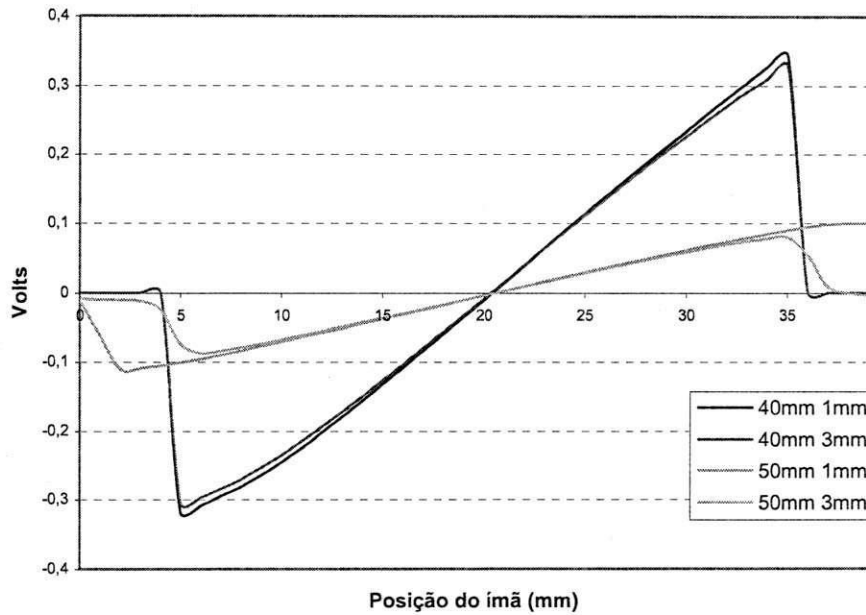


Figura 53 - Comparação entre os sinais diferenciais dos sensores de 40mm e de 50mm de comprimento com eixos polares cilíndricos de 50mm.

Nos gráficos seguintes nós podemos ver o efeito do entreferro para os dois sensores utilizados:

Efeito entreferro de 1mm a 3mm com o sensor de 40mm

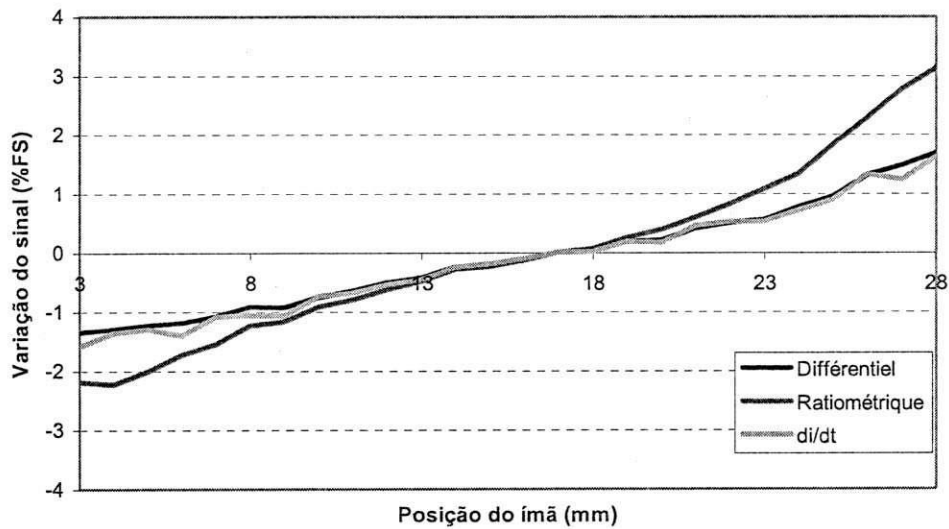


Figura 54 - Efeito de entreferro no sensor de 40mm de comprimento.

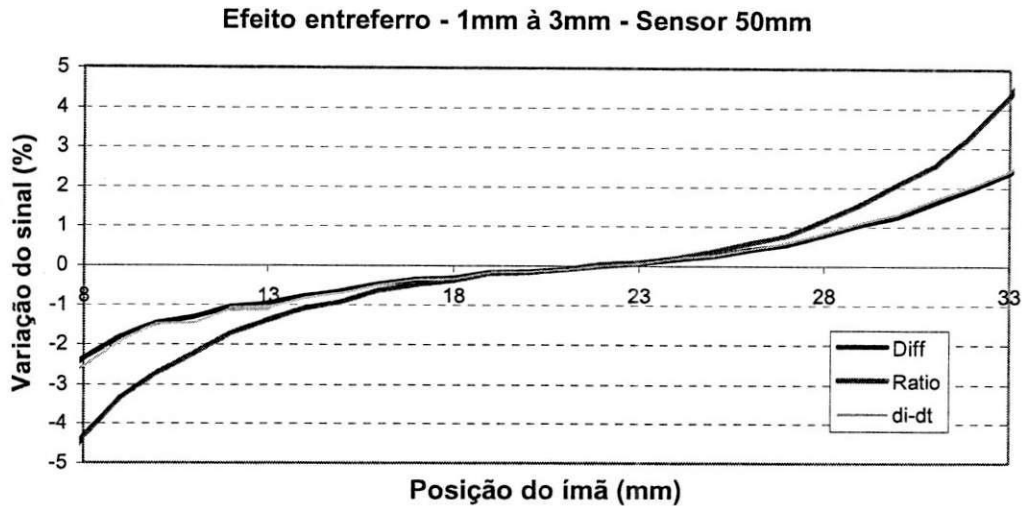


Figura 55 - Efeito de entreferro no sensor de 50mm de comprimento.

Observamos que o sensor de 40mm possui um pouco menos de efeito de entreferro que o sensor de 50mm, para um comprimento útil de 25mm. A utilização de eixos de realimentação de diferentes tamanhos pode ser a razão desta diferença.

9.4 DIVERSOS EIXOS POLARES

Condição de ensaio :

- Sensor 40mm ;
- Eixos polares cilíndricos de 40mm, 45mm e 50mm ;
- Eixo de realimentação de 40mm ;
- Corrente senoidal no primário : 6mA eficaz ;
- Frequência : 5kHz ;
- Entreferros : 0mm, 1mm, 2mm e 3mm ;
- Posição do eixo de realimentação : Atrás do sensor.

Nós obtivemos os resultados seguintes com o eixo de 40mm :

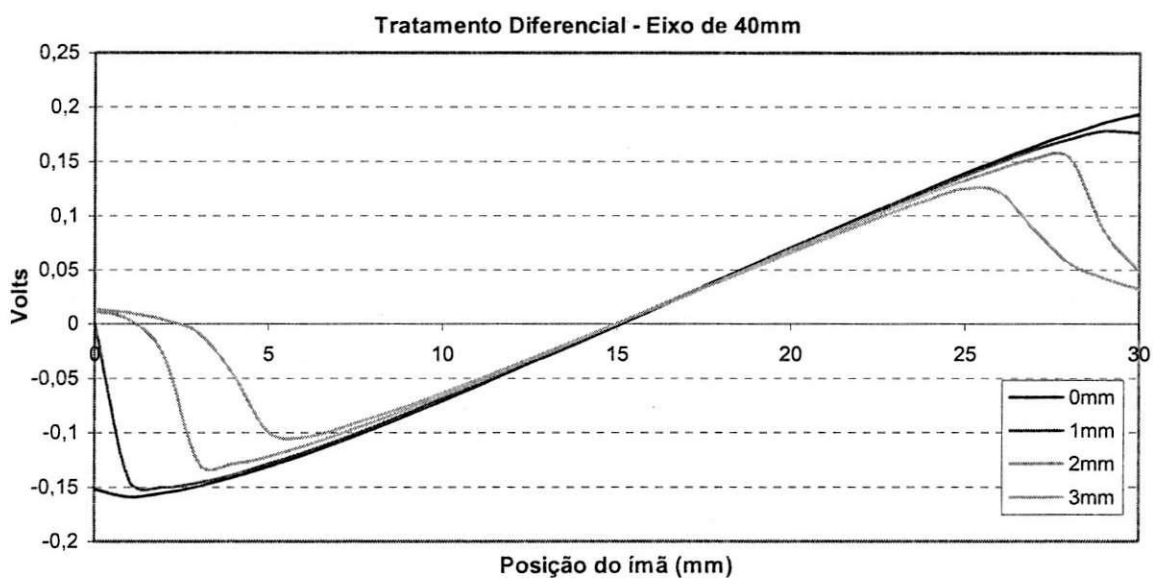


Figura 56 - Sinal diferencial com eixo polar de 40mm para diversos entreferros.

Tratamento Raciométrico - Eixo de 40mm

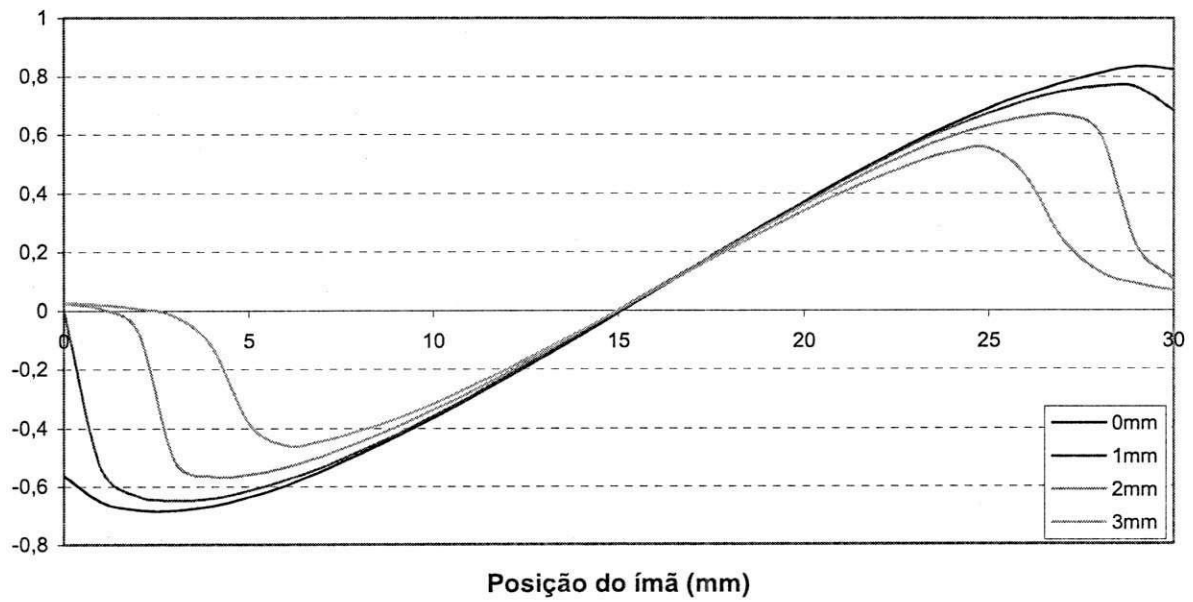


Figura 57 - Sinal raciométrico com eixo polar de 40mm para diversos entreferros.

Tratamento di/dt - Eixo de 40mm

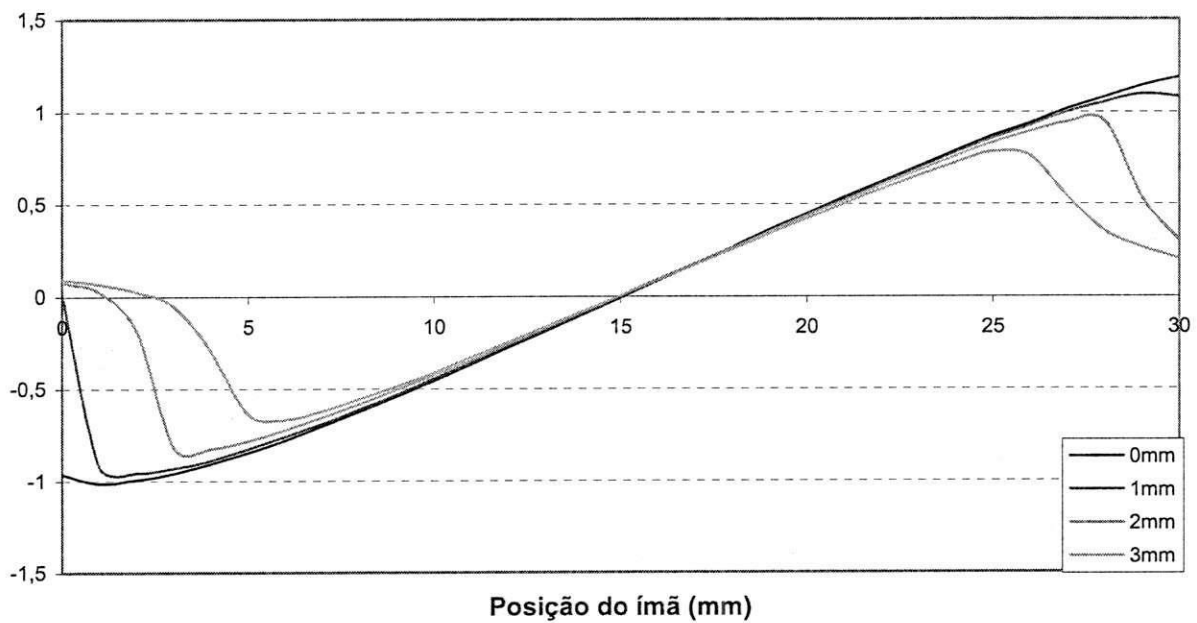


Figura 58 - Sinal di/dt com eixo polar de 40mm para diversos entreferros.

Para o sensor com o eixo de 45mm, os resultados foram os seguintes :

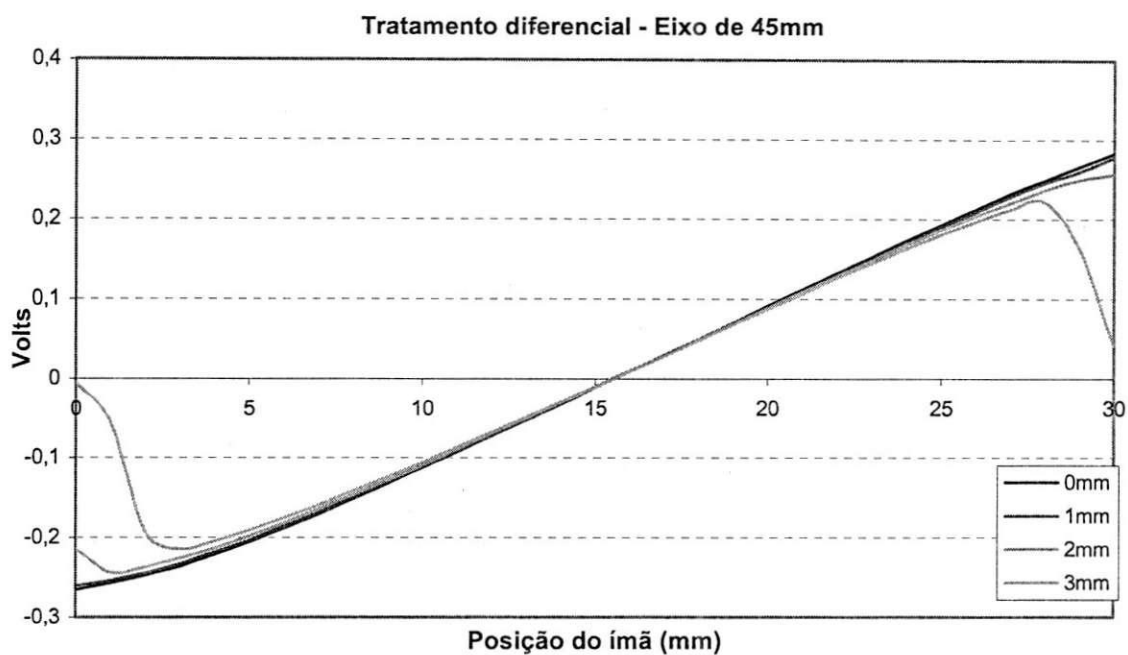


Figura 59 - Sinal diferencial com eixo polar de 45mm para diversos entrefeirros.

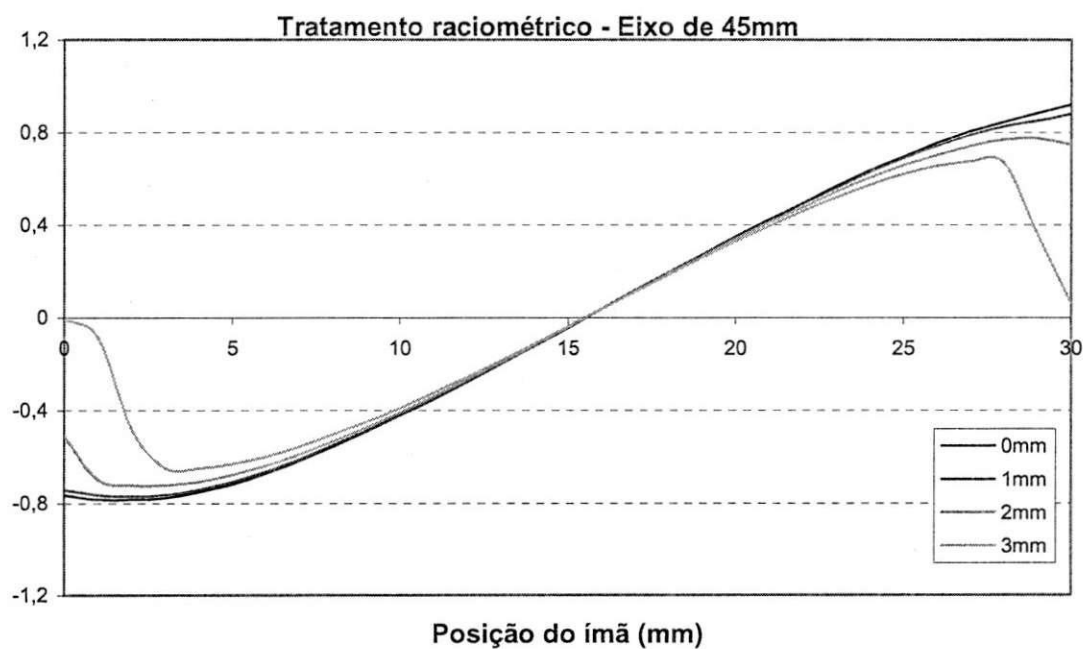


Figura 60 - Sinal ratiométrico com eixo polar de 45mm para diversos entrefeirros.

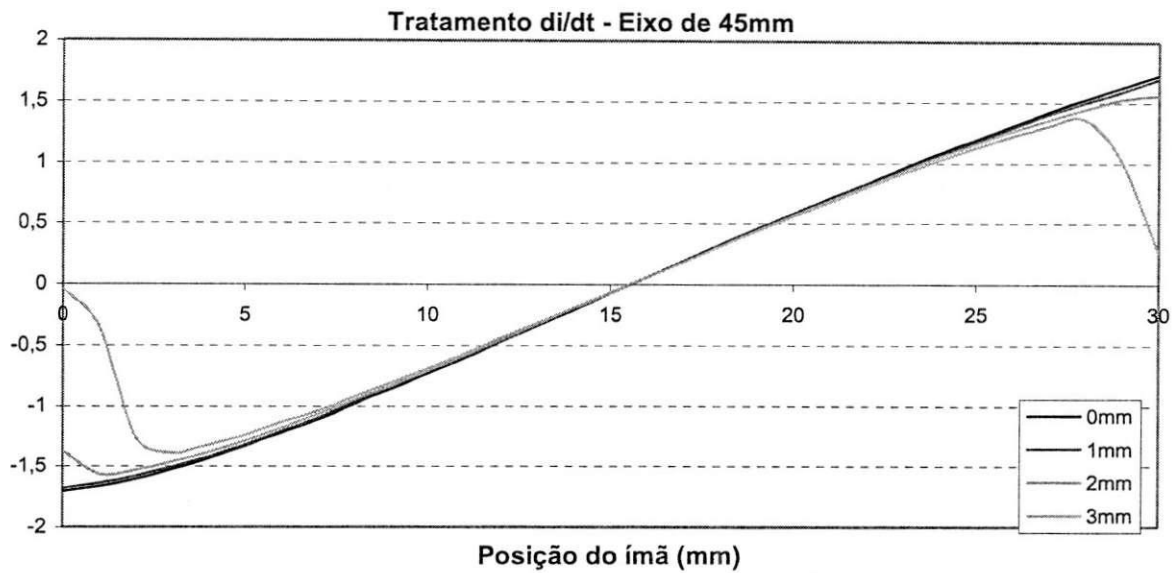


Figura 61 - Sinal ratiométrico com eixo polar de 45mm para diversos entreferros.

Os gráficos com o sensor com o eixo de 50mm são os seguintes:

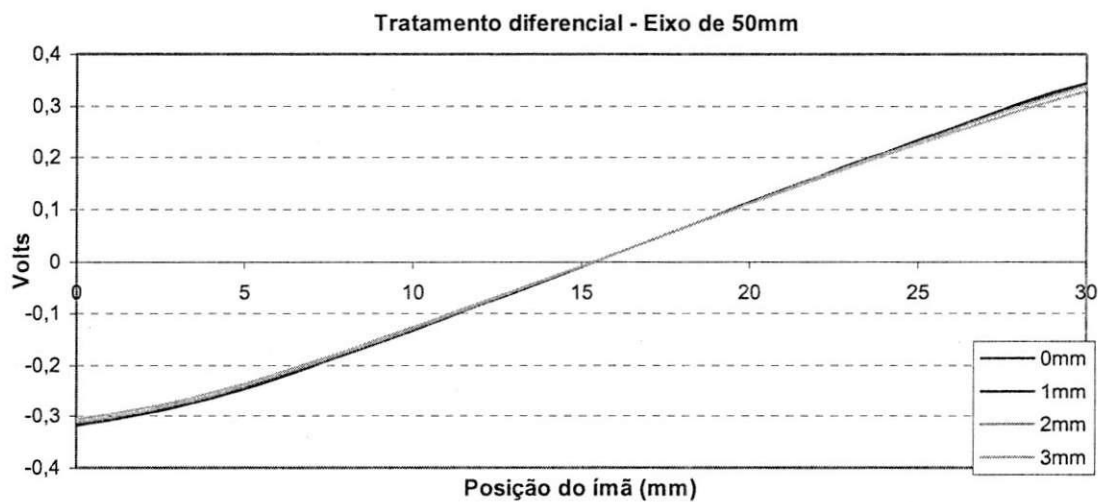


Figura 62 - Sinal diferencial com eixo polar de 50mm para diversos entreferros.

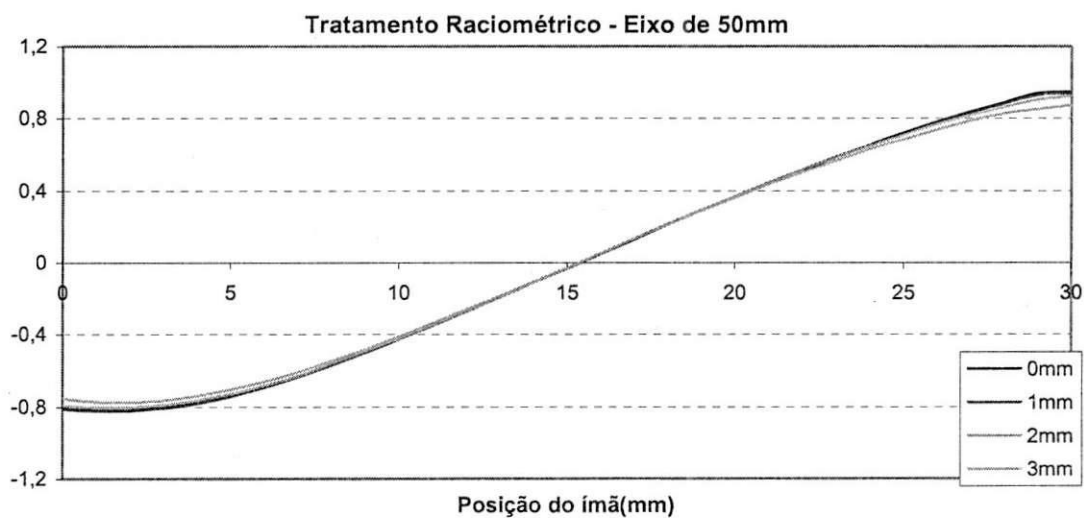


Figura 63 - Sinal ratiométrico com eixo polar de 50mm para diversos entreferros.

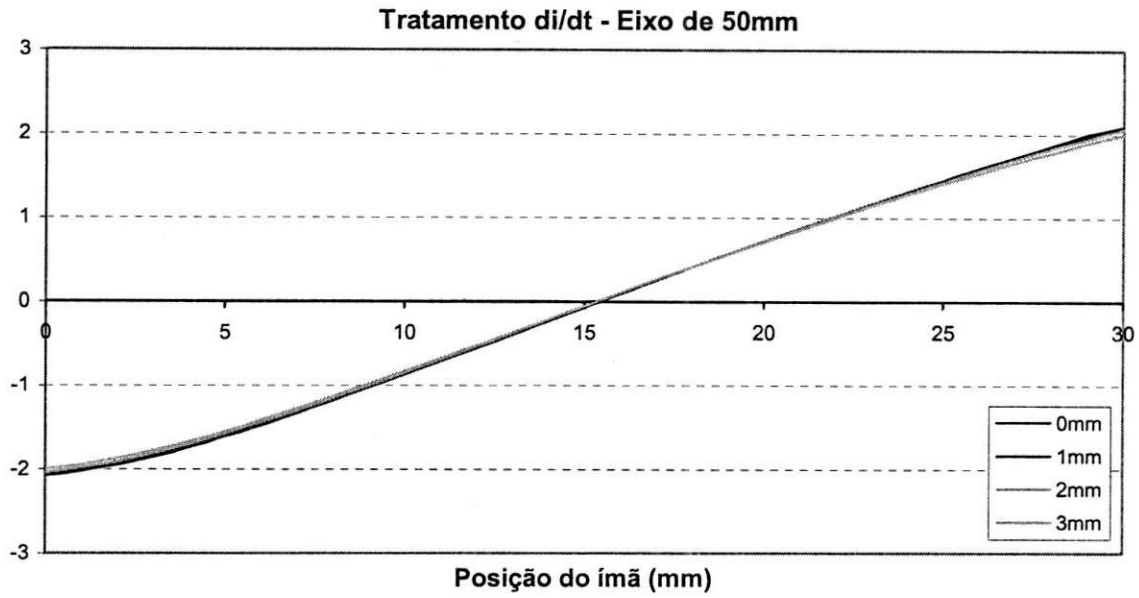


Figura 64 - Sinal ratiométrico com eixo polar de 50mm para diversos entreferros.

Efeito de entreferro:

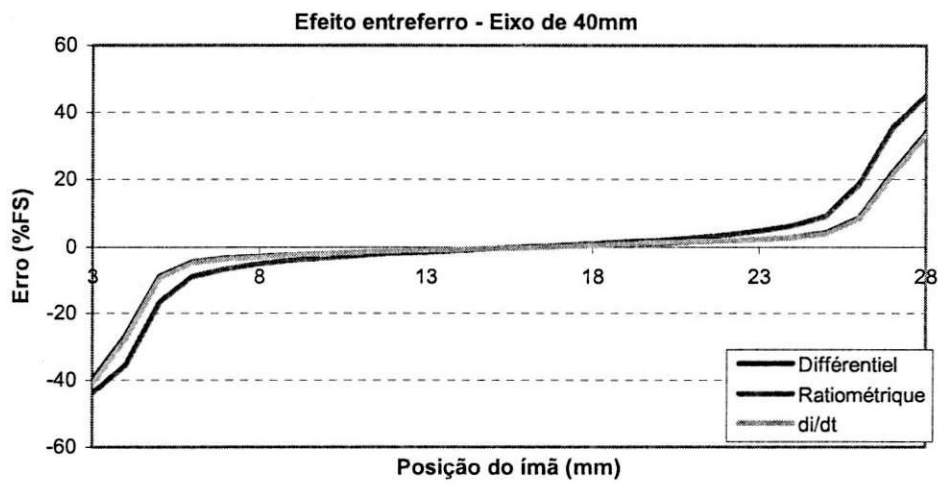


Figura 65 - Efeito entreferro com eixo polar de 40mm.

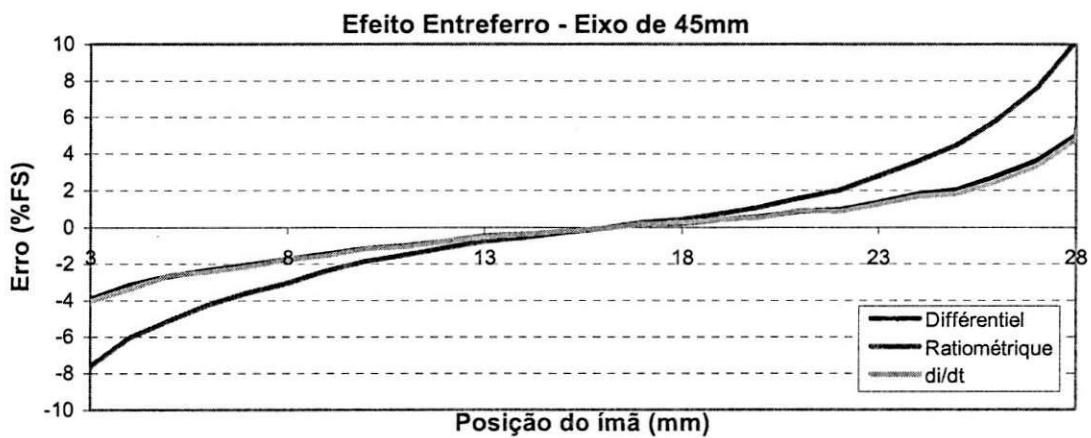


Figura 66 - Efeito entreferro com eixo polar de 45mm.

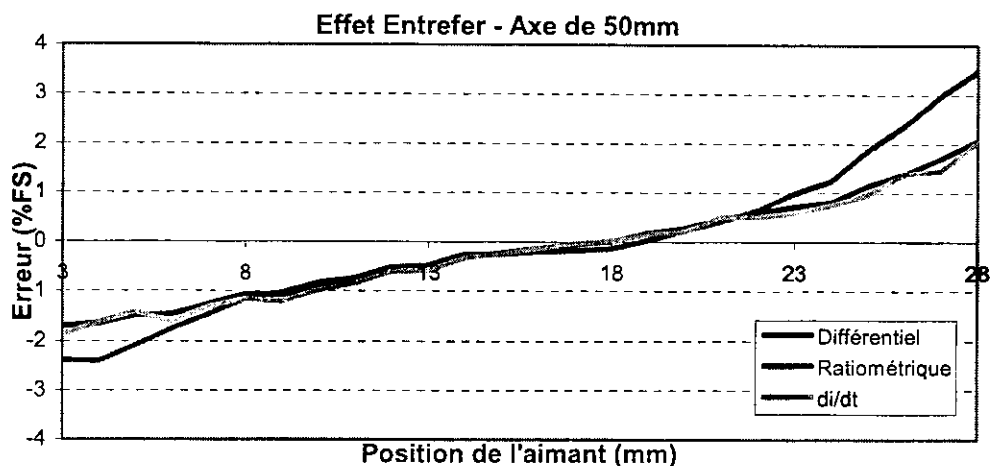


Figura 67 - Efeito entreferro com eixo polar de 50mm.

Vemos que temos menos efeito de entreferro quando utilizamos eixos polares mais longos.

Nós podemos fazer uma tabela resumida dos comprimentos das zonas monótonas de cada eixo polar :

Tabela 2 - Comprimento da zona monótona

Entreferros	Comprimento da zona monótona								
	40mm			45mm			50mm		
	Diff	Ratio	di/dt	Diff	Ratio	di/dt	Diff	Ratio	di/dt
0mm	29mm	29mm	29mm	30mm	30mm	30mm	30mm	30mm	30mm
1mm	27mm	25mm	27mm	30mm	28mm	30mm	30mm	29mm	30mm
2mm	25mm	23mm	24mm	29mm	26mm	29mm	30mm	29mm	30mm
3mm	19mm	19mm	19mm	25mm	24mm	25mm	30mm	28mm	30mm

Podemos observar que não é a distância entre as bobinas secundárias do sensor que nos dá menos efeito de entreferro, mas sim o tamanho do eixo polar. Então, com os eixos polares maiores ele é mais fácil de saturar a bobinagem primária do sensor, mesmo com um entreferro mais forte.

9.5 DIVERSOS EIXOS DE REALIMENTAÇÃO

Condições de ensaio :

- Sensor 40mm;
- Eixo polar cilíndrico de 45mm ;
- Eixo de realimentação plano de 45mm e cilíndrico de 45mm e 50mm;
- Corrente senoidal no primário : 6mA eficaz ;
- Frequência : 5kHz ;
- Entreferros : 0mm, 1mm, 2mm e 3mm;
- Posição do eixo de realimentação : atrás do sensor.

O efeito de entreferro de cada eixo de realimentação é mostrado sobre os gráficos seguintes :

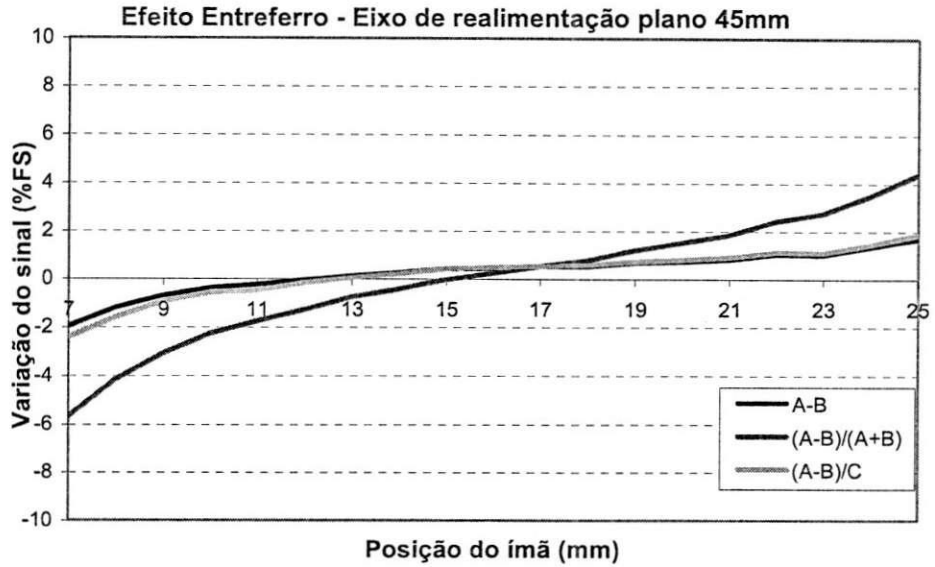


Figura 68 - Efeito entreferro com eixo realimentação plano de 45mm.

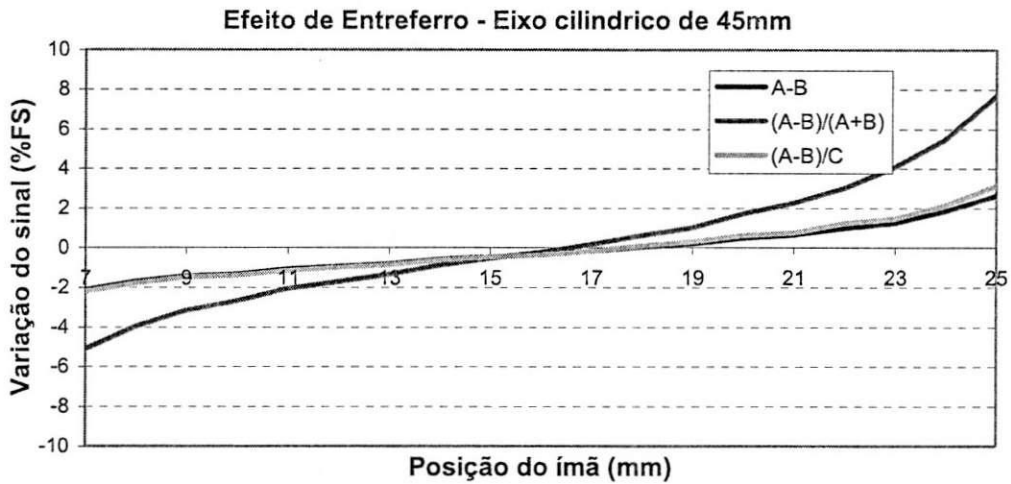


Figura 69 - Efeito entreferro com eixo realimentação cilíndrico de 45mm.

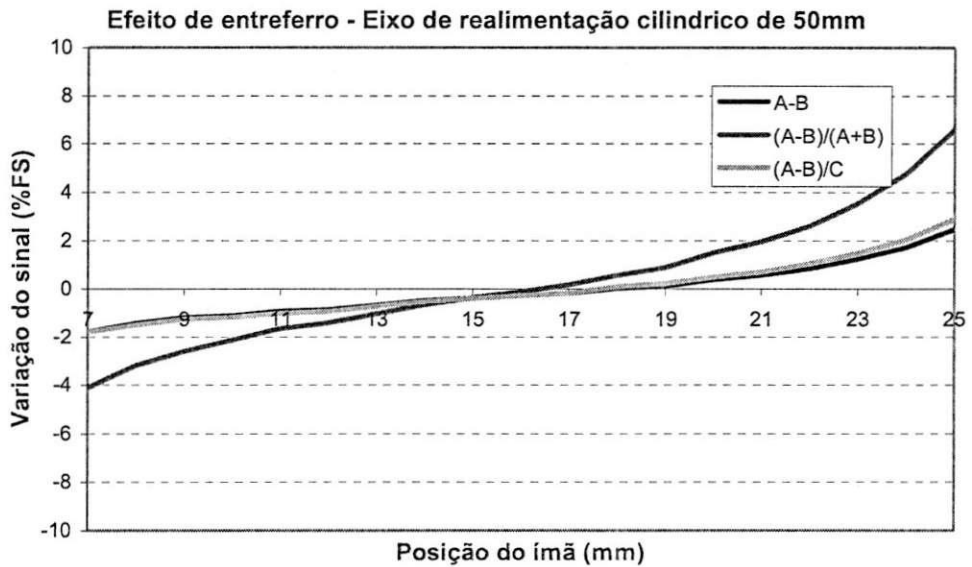


Figura 70 - Efeito entreferro com eixo realimentação cilíndrico de 50mm.

Vemos que temos menos efeito de entreferro com os tratamentos diferencial e di/dt. Podemos também dizer que o efeito de entreferro é quase o mesmo para os três eixos utilizados.

Podemos fazer uma tabela resumida dos comprimentos das zonas monótonas de cada eixo de realimentação:

Tabela 3 - Comprimento da zona monótona

Entreferrros	Eixo de realimentação								
	Plano			45mm Cilindrico			50mm Cilíndrico		
	Diff	Ratio	di/dt	Diff	Ratio	di/dt	Diff	Ratio	di/dt
0mm	30mm	29mm	30mm	30mm	28mm	30mm	30mm	29mm	30mm
1mm	30mm	28mm	30mm	30mm	28mm	30mm	30mm	28mm	30mm
2mm	28mm	26mm	28mm	28mm	26mm	28mm	28mm	26mm	28mm
3mm	22mm	21mm	22mm	23mm	21mm	22mm	23mm	21mm	23mm

Observamos que a utilização de eixos de realimentação de diferentes tamanhos não há efeito sobre o comportamento do sensor, e não há efeito sobre o comprimento da zona monótona.

9.6 CONCLUSÃO

Podemos concluir que a posição do eixo de realimentação deve ser atrás do sensor. Podemos ver que não é o comprimento da bobina primária do sensor que nos fornece um comprimento útil maior, mas sim o tamanho do eixo polar. Logo, com eixos polares maiores, é mais fácil de saturar a bobinagem primária do sensor, mesmo com um entreferro mais forte. O tratamento diferencial e di/dt possuem menos efeito de entreferro.

10 TEMPERATURA

10.1 SENSOR 50MM V.1

Condição de ensaio :

- Frequência : 5kHz ;
- Corrente senoidal eficaz no primário: 7.5mA ;
- Entreferro: 1mm ;
- Temperaturas : -40°C, 25°C e 150°C ;
- Parâmetros do GBF.VI (número de pontos) : 1000 ;
- Parâmetros do XCPL01(frequência de amostragem) : 123kHz ;
- Tamanho dos eixos polares : 50mm ;
- Posição do eixo de realimentação : atrás do sensor.

Nós obtivemos os seguintes gráficos após o tratamento dos sinais em temperaturas diferentes :

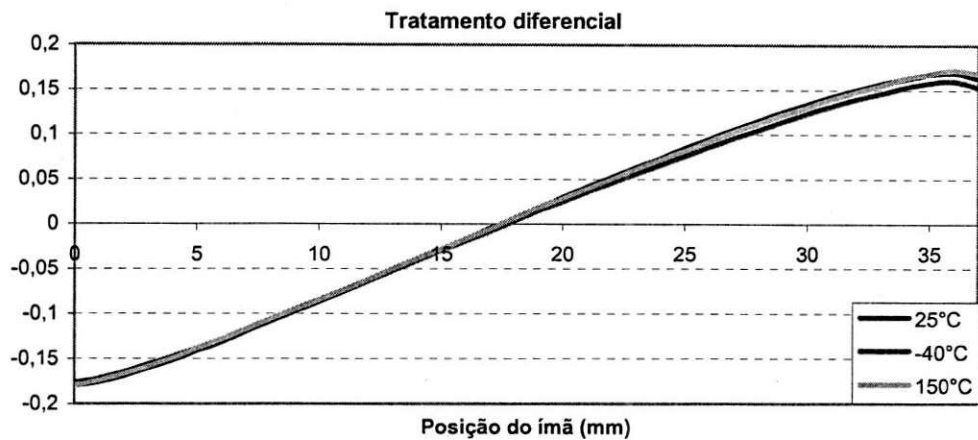


Figura 71 - Sinal diferencial para o sensor submetido a diversas temperaturas.

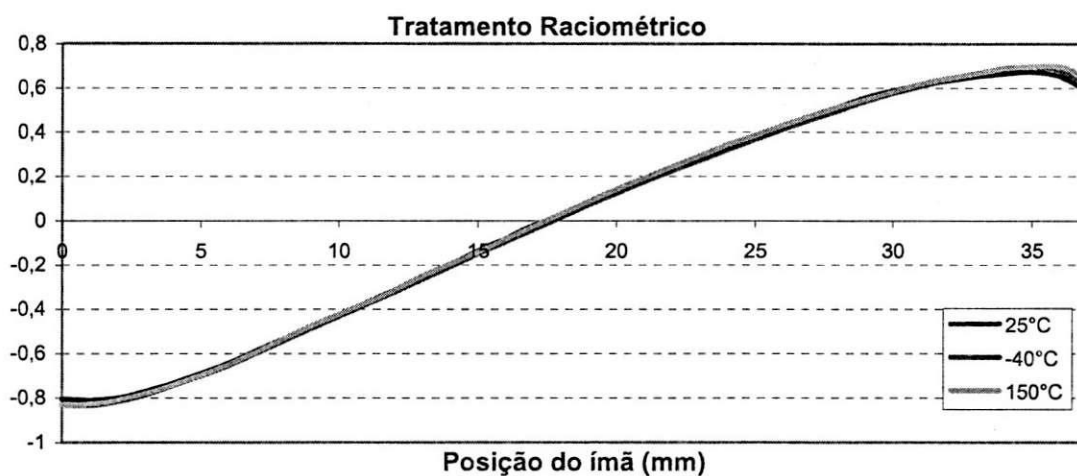


Figura 72 - Sinal raciométrico para o sensor submetido a diversas temperaturas.

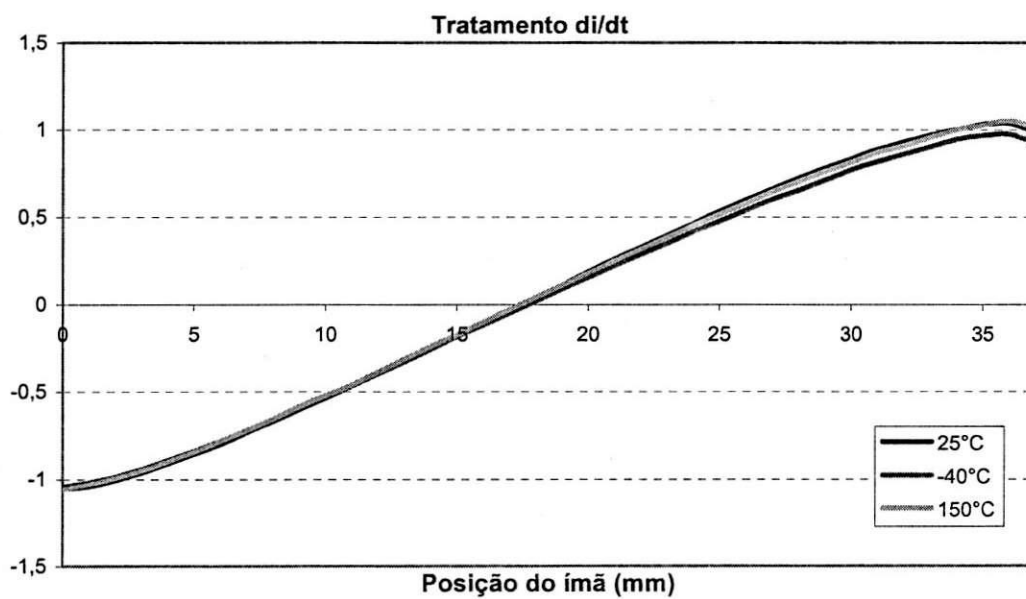


Figura 73 - Sinal di/dt para o sensor submetido a diversas temperaturas.

Nós confirmamos que nosso sensor é robusto a variação de temperatura, pois ele quase não modifica a inclinação da curva. O gráfico de efeito de temperatura nos mostra que, em um comprimento útil de 35mm, nós temos +/-2% de erro à -40°C e +/-1% de erro nos tratamentos diferencial e di/dt, e +/-2% para o tratamento ratiométrico à 150°C. Nós podemos ver o efeito de temperatura nos gráficos seguintes:

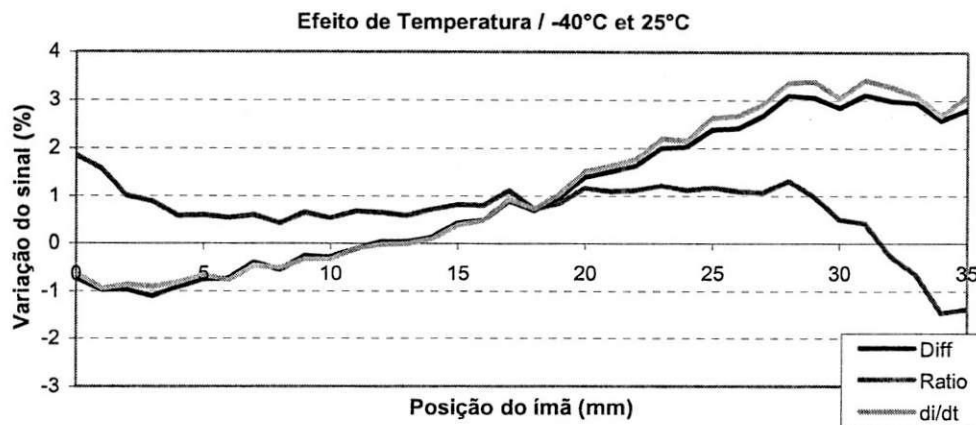


Figura 74 - Efeito de temperatura entre -40°C e 25°C

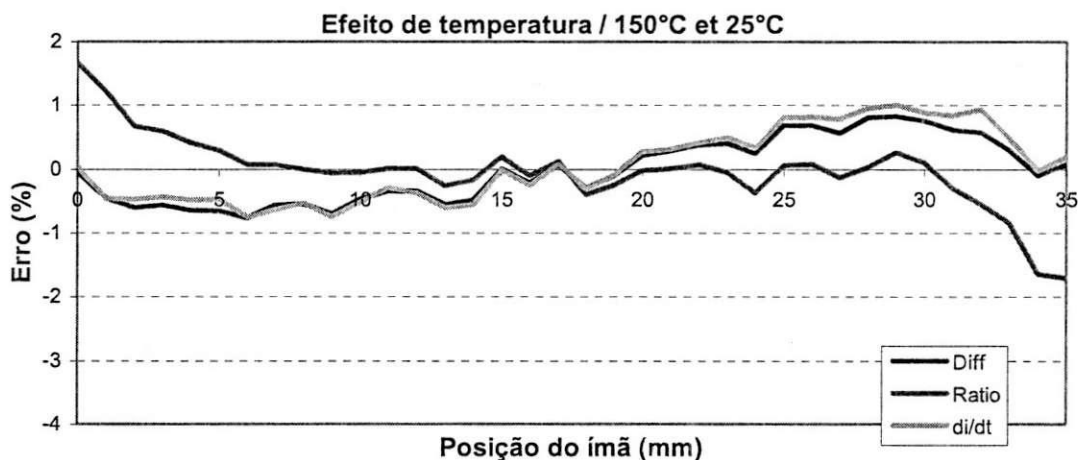


Figura 75 - Efeito de temperatura entre 150°C e 25°C

10.2 SENSOR 50MM V.2

Condições de ensaio :

- Freqüência : 6.5kHz ;
- Corrente senoidal eficaz no primário: 8mA ;
- Entreferro : 1mm ;
- Temperaturas : -40°C, 25°C e 150°C ;
- Parâmetros do GBF.VI (número de pontos) : 1000 ;
- Parâmetros do XCPL01(amostragem) : 123kHz ;
- Tamanho dos eixos polares : 50mm ;
- Posição do eixo de realimentação : atrás do sensor.

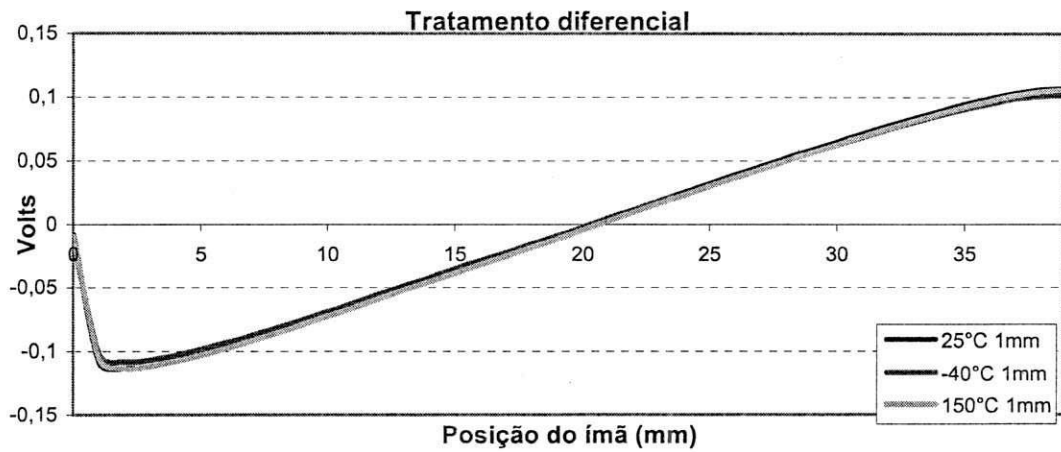


Figura 76 - Sinal diferencial para diversas temperaturas e entreferro de 1mm.

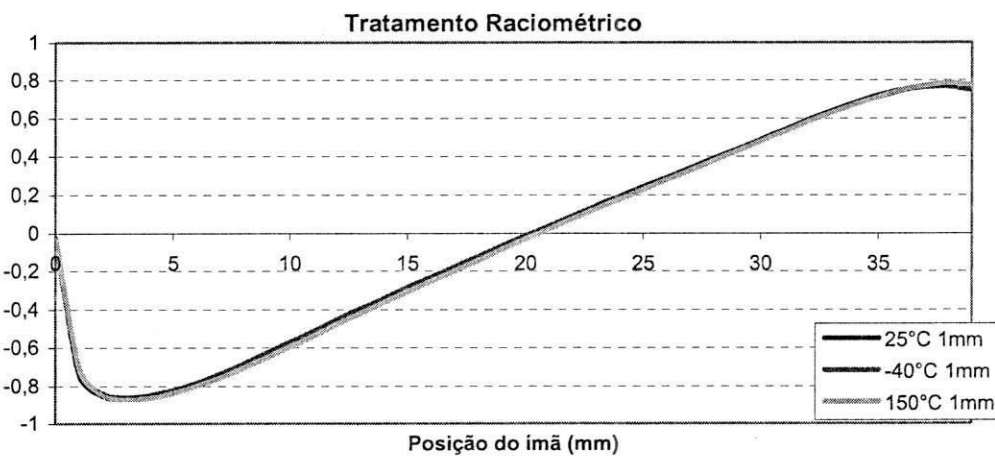


Figura 77 - Sinal raciométrico para diversas temperaturas e entreferro de 1mm.

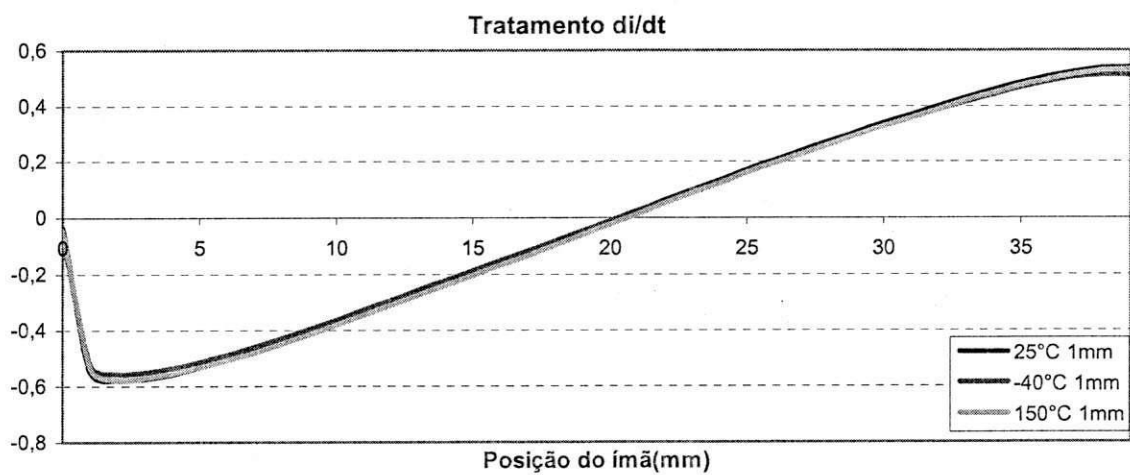


Figura 78 - Sinal di/dt para diversas temperaturas e entreferro de 1mm.

Podemos ver nos gráficos que há uma pequena diferença entre os sinais para cada temperatura. Vimos durante o experimento que a corrente de excitação do primário do sensor tinha uma pequena variação em temperatura. Então, esta variação de corrente é um dos fatores que causaram a variação do seu sinal. Os outros fatores que podem influenciar são o campo magnético do ímã e a resistividade dos eixos polares (eles podem mudar de comportamento com a variação de temperatura).

Observamos que nos tratamentos de sinal diferencial e di/dt , nós tivemos um pouco de variação entre os sinais à 40°C. Em contrapartida, o tratamento ratiométrico compensou esta variação, e nós não temos quase diferença entre os sinais.

Podemos ver o efeito de temperatura nos gráficos seguintes, em um comprimento útil de 35mm. Eles mostram a variação do sinal entre as temperaturas de -40°C e 25°C, e entre 150°C e 25°C.

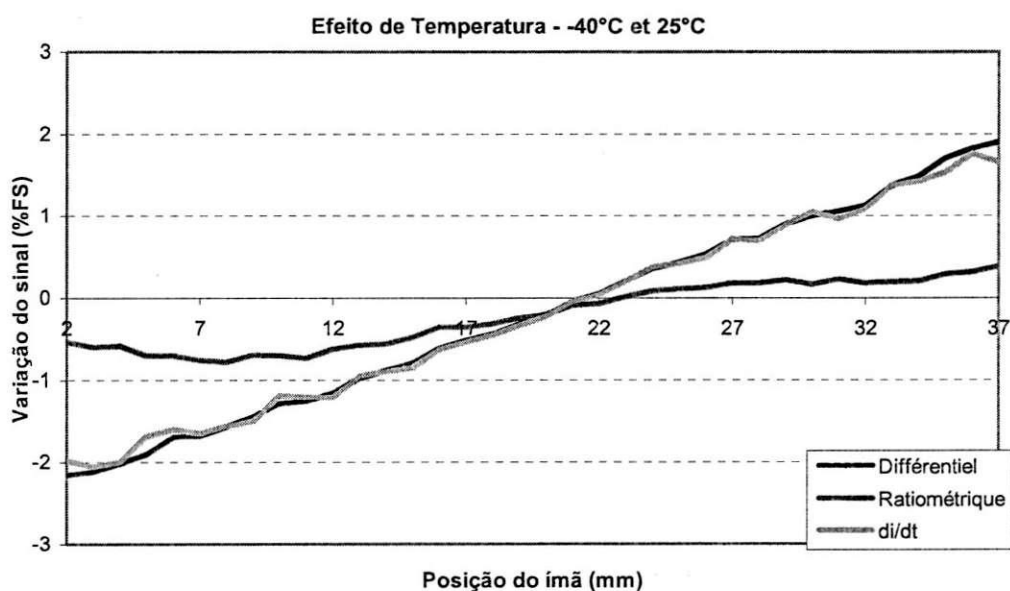


Figura 79 - Efeito de temperatura para entreferro de 1mm entre -40°C e 25°C

Vemos que o efeito de temperatura é de aproximadamente +/-0,8% para o tratamento ratiométrico e de +/-2% para os tratamentos diferencial e di/dt , à -40°C.

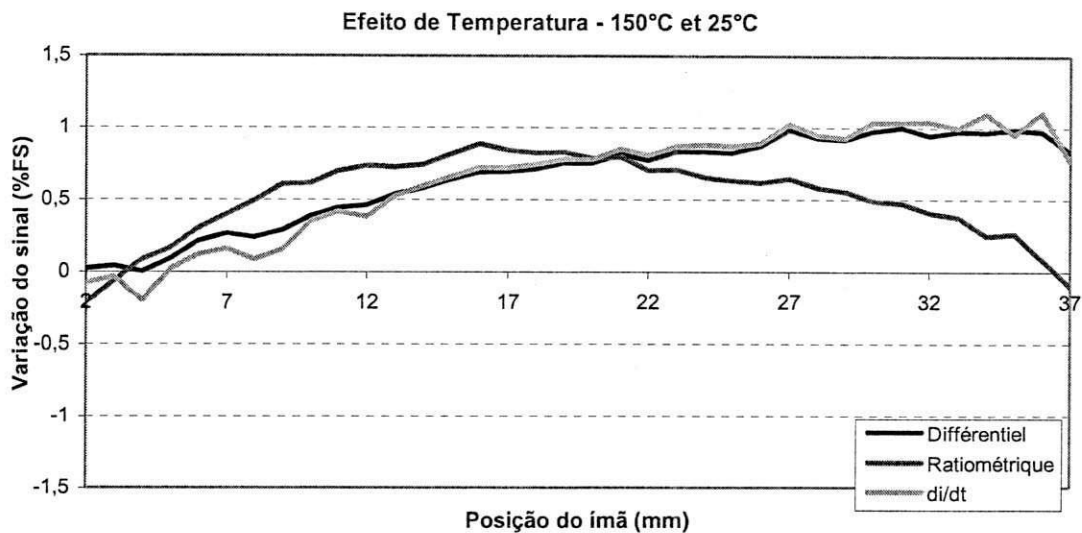


Figura 80 - Efeito de temperatura para entreferro de 1mm entre 150°C e 25°C

O efeito de temperatura à 150°C é de +/-0,5%.

Então, estes gráficos confirmam que nosso sensor é estável a variação de temperatura.

10.3 CONCLUSÃO

Vemos que para os dois sensores, temos no máximo +/-2% de erro se variamos a temperatura de -40°C à 150°C.

11 FATORES EXTERNOS

11.1 LIMALHA DE FERRO

No início deste experimento, nós fizemos as medições com o ímã limpo e depois adicionamos as quantidades de 407.2mg, 635.9mg, 896.7mg, 1099.2mg e 1398.2mg de limalha de ferro, então fizemos uma medição para cada quantidade de limalha de ferro. Podemos ver cada quantidade de limalha de ferro sobre o ímã nas fotos seguintes :

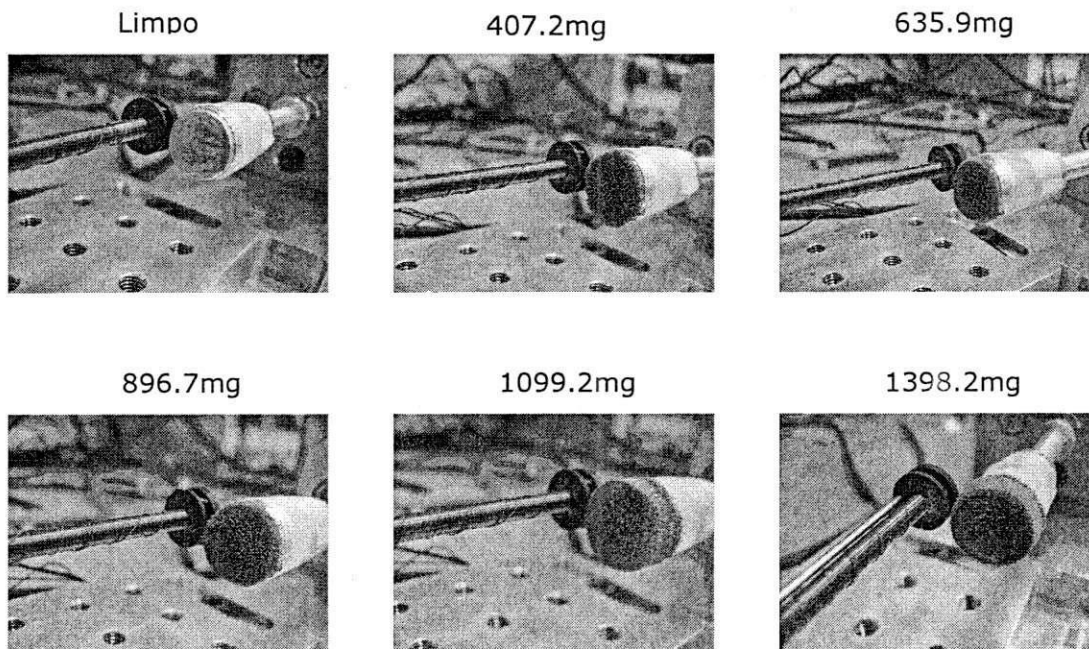


Figura 81 - Diversas quantidades de limalha de ferro sobre o ímã

11.1.1 RESULTADOS

As tensões dos secundários que nós obtivemos são mostrados nos gráficos seguintes :

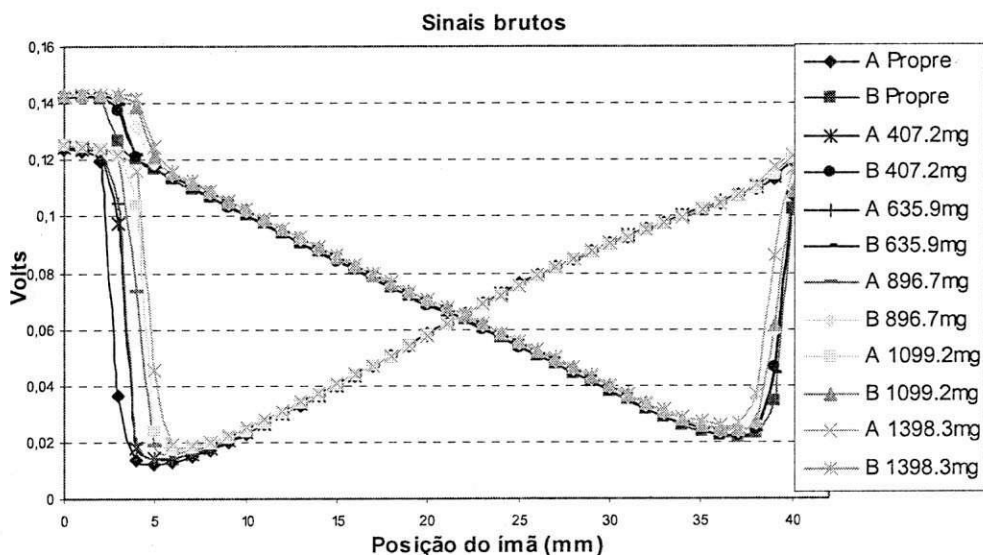


Figura 82 - Sinais brutos do sensor com diversas quantidades de limalha de ferro sobre o ímã.

Nos gráficos seguintes, mostraremos os sinais do sensor para cada tipo de tratamento do sinal.

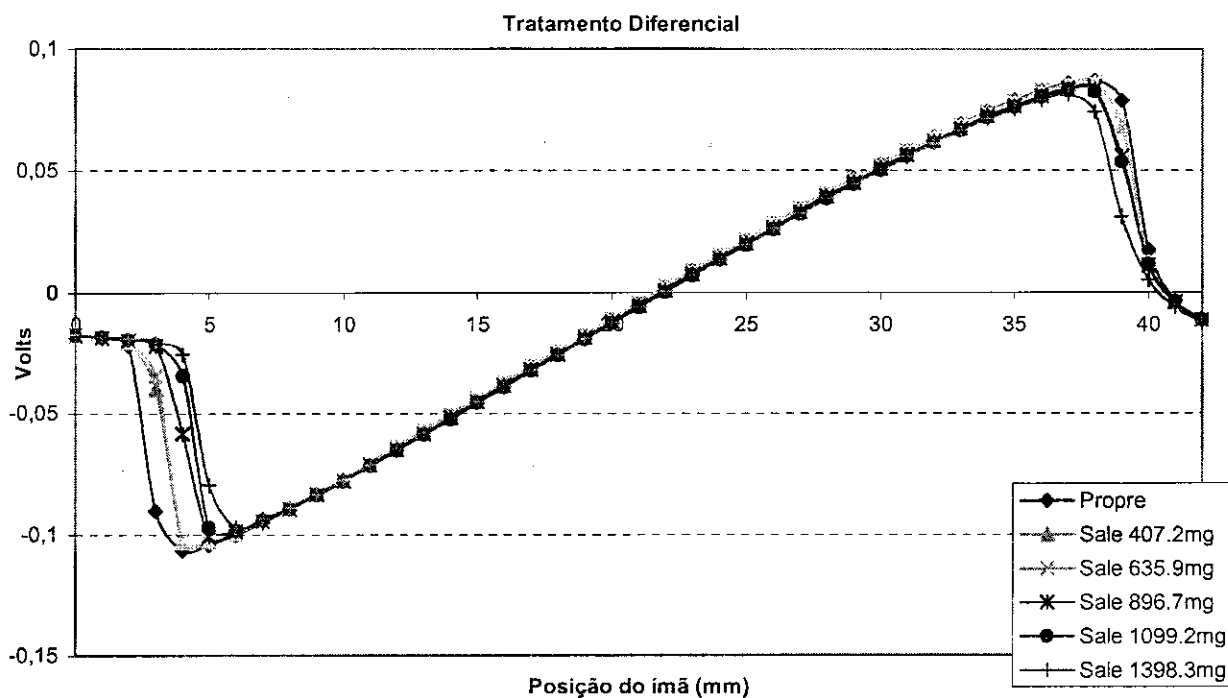


Figura 83 - Sinal diferencial do sensor com diversas quantidades de limalha de ferro sobre o ímã.

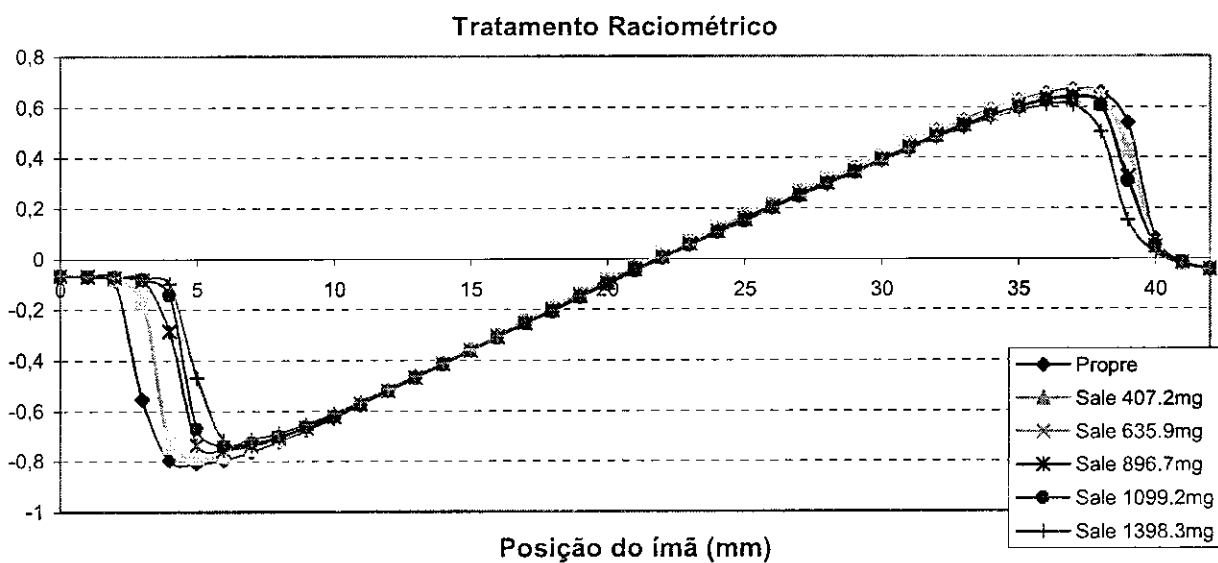


Figura 84 - Sinal raciométrico do sensor com diversas quantidades de limalha de ferro sobre o ímã.

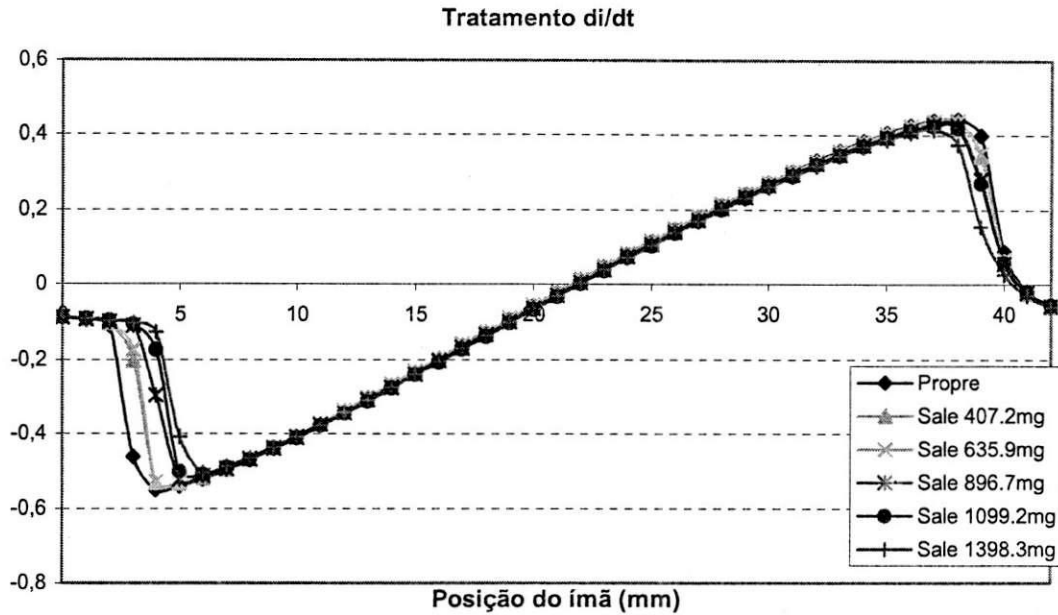


Figura 85 - Sinal di/dt do sensor com diversas quantidades de limalha de ferro sobre o ímã.

Podemos ver sobre os gráficos do tratamento do sinal que tivemos um pouco mais de efeito no lado esquerdo do que no direito, porque o pó de ferro não estava distribuído uniformemente sobre o ímã.

Variação do sinal em relação ao peso da limalha em um ponto fixo

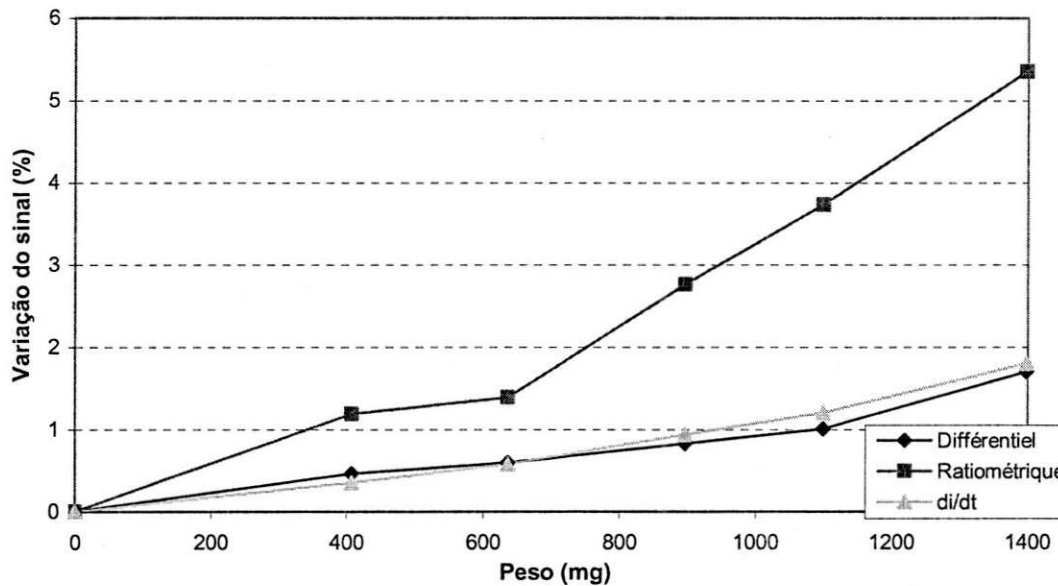


Figura 86 - Variação do sinal do sensor em função das quantidades de limalha de ferro sobre o ímã.

No gráfico da variação de sinal em relação ao peso de limalha de ferro, à uma posição fixa (6mm), nós constatamos que a variação do sinal é diretamente proporcional ao peso da limalha de ferro, e que os tratamentos diferencial e di/dt possuem menos influencia dessa variação.

11.1.2 CONCLUSÃO

Podemos concluir que quando adicionamos limalha de ferro sobre o ímã, seu campo magnético torna-se um pouco mais fraco, então ele não chega à saturar o primário do sensor do mesmo jeito que quando o ímã está limpo.

11.2 MICRO VARIAÇÃO DE ENTREFERRO

Condições de ensaio :

- Sensor 50mm V.2
- Eixo de realimentação cilíndrico de 50mm ;
- Eixos polares cilíndricos utilizados : 50mm e 55 mm ;
- Sensor alimentado com uma corrente senoidal de 7.5mA no primário ;
- Frequência : 6.5kHz ;
- Entreferros : 1.6mm, 1.8mm e 2.0mm ;

11.2.1 RESULTADOS

Começamos o experimento utilizando um eixo polar cilíndrico de 50mm. Podemos ver o efeito de entreferro sobre 30mm do comprimento útil nos gráficos seguintes :

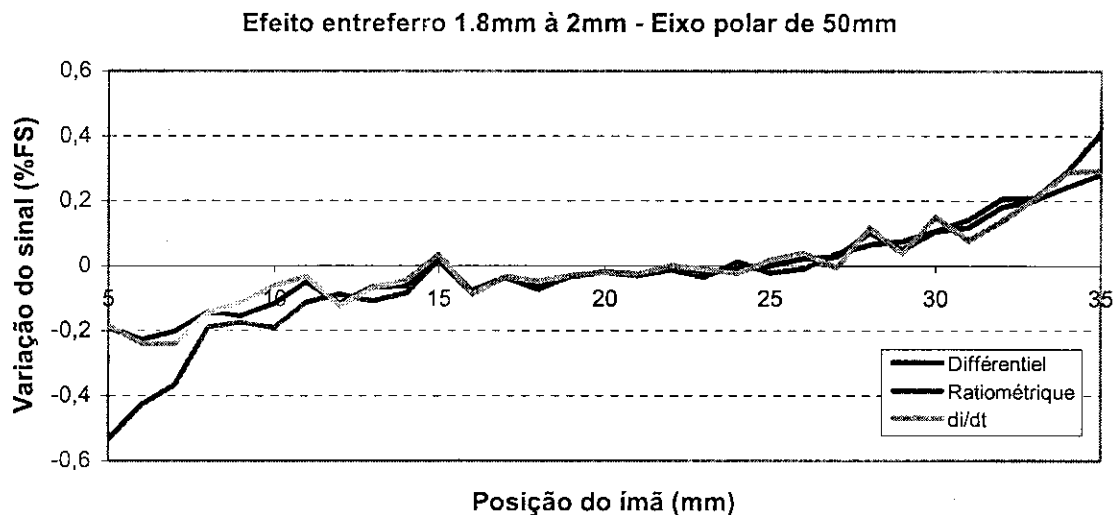


Figura 87 -Variação do sinal do sensor em função da pequena variação de entreferro.

Podemos ver que o efeito de entreferro é aproximadamente de $\pm 0.2\%$ para os tratamentos diferencial e di/dt e $\pm 0.45\%$ para o tratamento ratiométrico. Nos próximos gráficos, temos o efeito de entreferro utilizando o eixo polar cilíndrico de 55mm :

Efeito entreferro 1.6mm à 1.8mm - Eixo polar de 55mm

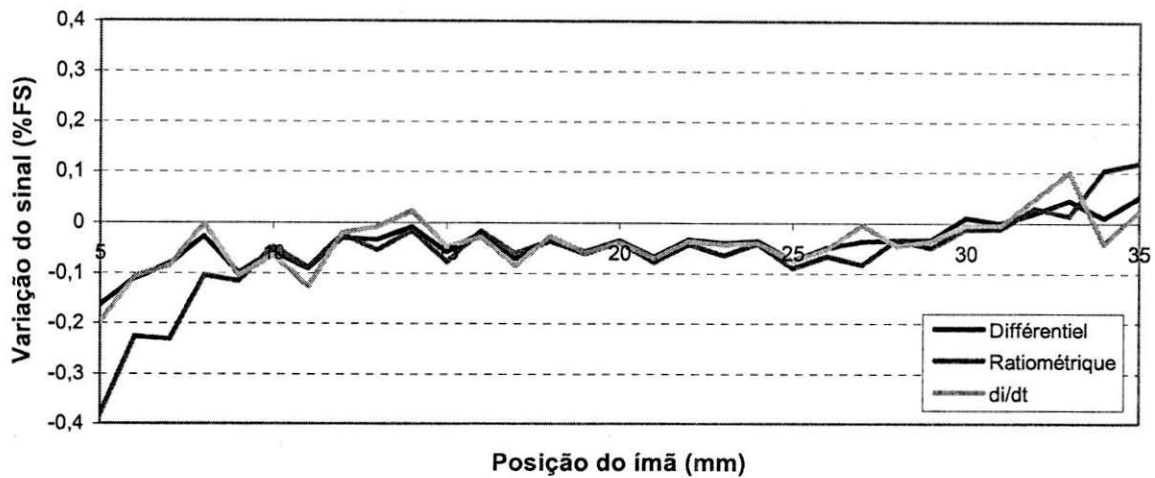


Figura 88 -Variação do sinal do sensor em função da pequena variação de entreferro, para vários tratamentos do sinal, com eixo polar de 55mm.

Efeito entreferro 1.8mm à 2mm - Eixo polar de 55mm

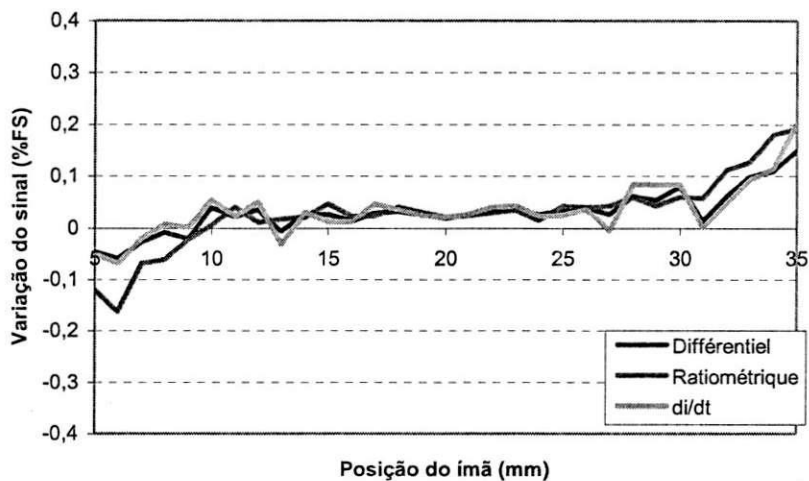


Figura 89 -Variação do sinal do sensor em função da pequena variação de entreferro, para vários tratamentos do sinal, com eixo polar de 55mm.

Vemos que sobre um comprimento útil de 30mm, o efeito é de aproximadamente $\pm 0.15\%$ para os tratamentos diferencial e di/dt e de $\pm 0.25\%$ para o tratamento ratiométrico.

11.2.2 CONCLUSÃO

Vemos que o efeito entreferro é maior no começo e no fim do comprimento do sensor, por causa dos efeitos de bordas. Como os eixos polares maiores diminuem estes efeitos, temos menos efeitos de entreferro quando utilizamos o eixo de 55mm. Podemos ver que para 85% da zona monótona do sensor, temos sempre menos de 0.1% de variação do

sinal. Então, uma pequena variação de entreferro não tem muita influência sobre os sinais do sensor.

11.3 HISTERESE

O objetivo deste experimento é de verificar o funcionamento do sensor com o eixo de realimentação de FeSi (mais barato que o de FeNi).

Condições de ensaio :

- Sensor 40mm;
- Eixo polar de 40mm ;
- Eixos de realimentação de FeNi e de FeSi plano de 45 mm de comprimento ;
- Corrente senoidal de 7.5mA no primário ;
- Freqüência : 5kHz
- Entreferros utilizados : 0mm, 1mm, 2mm e 3mm.

Os sinais brutos para cada tipo de eixo de realimentação são os seguintes :

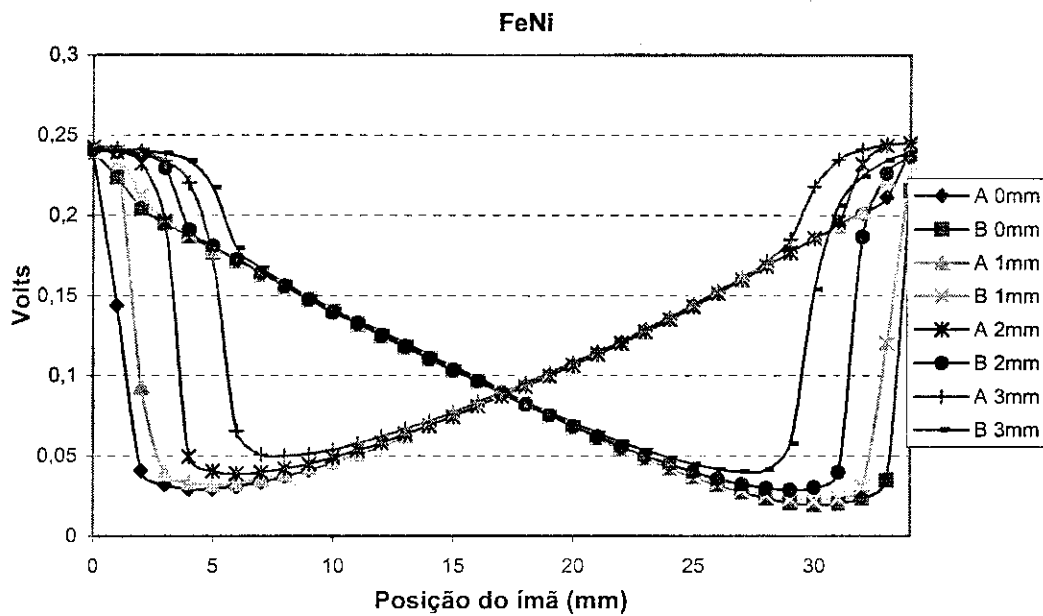


Figura 90 - Sinais brutos do sensor utilizando um eixo polar de FeNi para vários entreferros.

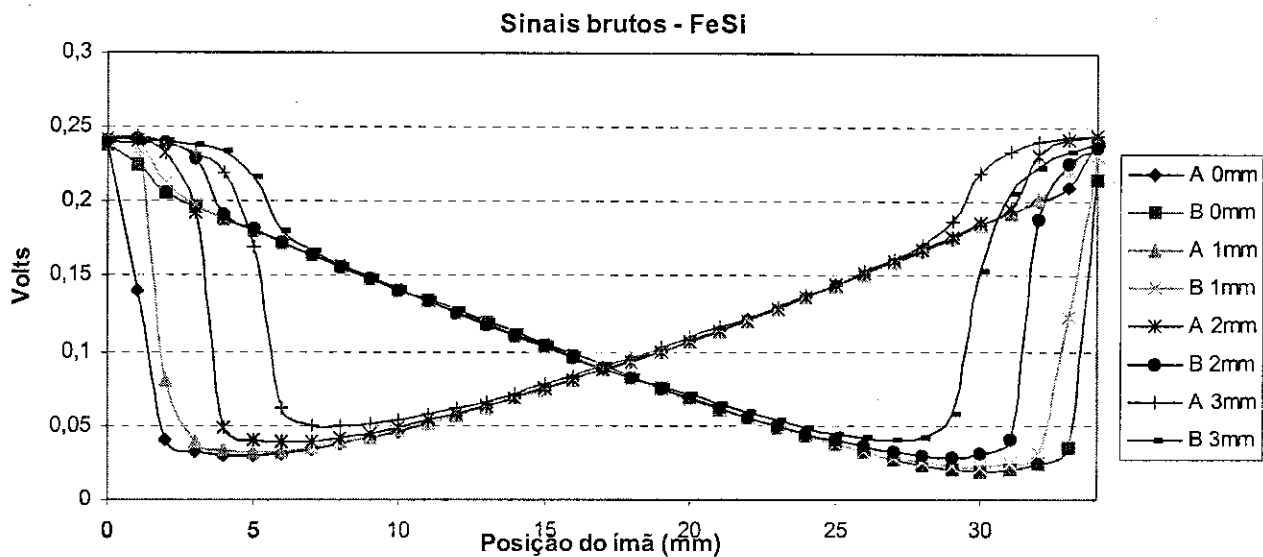


Figura 91 - Sinais brutos do sensor utilizando um eixo polar de FeSi para vários entreferros.

Podemos ver que o comprimento útil dos dois eixos são praticamente os mesmos :

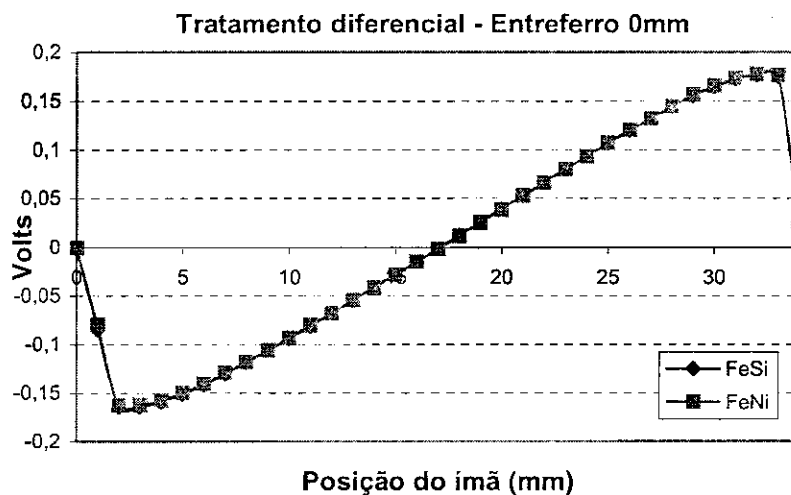


Figura 92 - Sinal diferencial do sensor comparando os dois tipos de eixo polar.

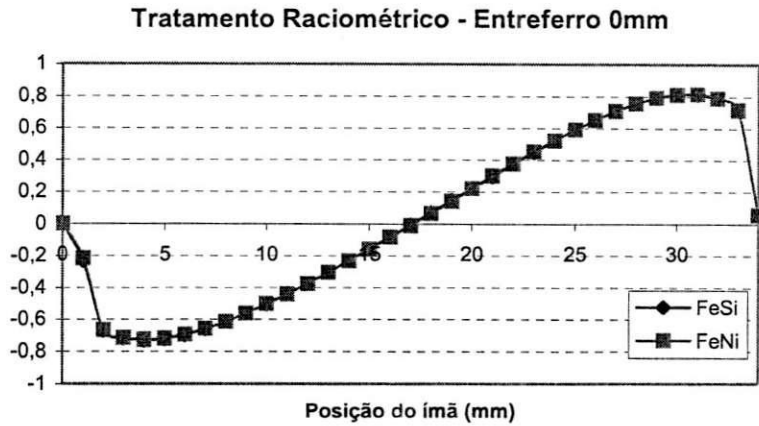


Figura 93 - Sinal raciométrico do sensor comparando os dois tipos de eixo polar.

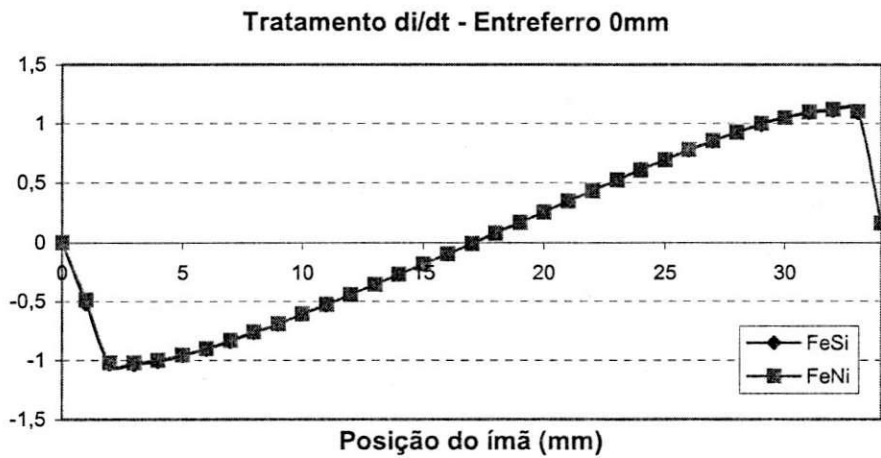


Figura 94 - Sinal di/dt do sensor comparando os dois tipos de eixo polar.

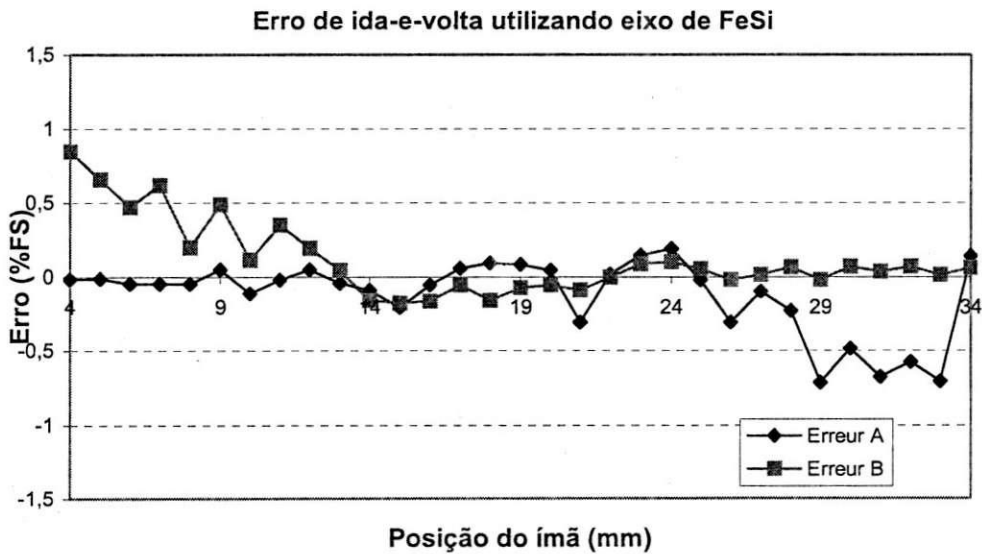


Figura 95 - Erro de ida-volta do ímã para o eixo polar de FeSi.

Vemos que não temos histerese sobre o sinal do sensor utilizando o eixo de FeSi. O gráfico representa a respeitabilidade de nossa medição para os dois sinais do secundário. Sobre um comprimento útil de 30mm, temos um erro máximo de 0,8% para cada sinal. Vemos que temos a possibilidade de utilizar o eixo de realimentação de FeSi, porque não vimos diferença entre os sinais do sensor, e ele é mais barato que o eixo de FeNi.

12 MODELO ELÉTRICO DO SENSOR

12.1 MODELO TEÓRICO

O modelo elétrico do sensor é baseado no modelo de um transformador. O esquema seguinte mostra este modelo:

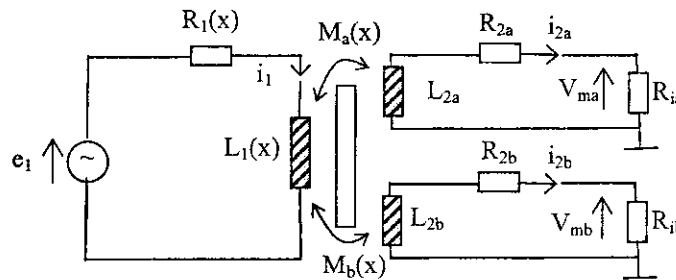


Figura 96 - Modelo simplificado do sensor LVDT.

Podemos então obter as seguintes equações :

- $e_1 = (R_1(x) + j\omega L_1(x)) * i_1 + j\omega M_a(x) * i_{2a} - j\omega M_b(x) * i_{2b}$
- $(R_{2a} + R_{ia} + j\omega L_{2a}) * i_{2a} + j\omega M_a(x) * i_1 = 0$
- $(R_{2b} + R_{ib} + j\omega L_{2b}) * i_{2b} + j\omega M_b(x) * i_1 = 0$
- $V_{ma} = R_{ia} * i_{2a}$
- $V_{mb} = R_{ib} * i_{2b}$

Com $R_i \gg R_2$ e $R_i \gg j\omega L_2$ temos :

- $V_{ma} = j\omega M_a(x) * i_1$
- $V_{mb} = j\omega M_b(x) * i_1$

12.2 EXPERIMENTO

12.2.1 MATERIAL UTILIZADO

- Um PC ;
- Placa de pilotagem da mesa linear ;
- Mesa linear ;
- Ímã ;
- Circuito de estabilização de corrente ;
- Alimentação ISSO-TECH IPS1810H (alimenta o circuito de estabilização de corrente) ;
- Software GBF.VI(gerador de função) ;
- Osciloscópio TEKTRONIX TDS210 ;

Condições de ensaio :

- Sensor 50mm V.2;
- Eixo polar cilíndrico de FeNi de 50mm ;
- Frequência : 5kHz
- Corrente no primário : 7.3mA

- Entreferro : 2mm.

Medimos a defasagem entre V_i (mesma fase da corrente) e as tensões dos secundários do sensor, também a corrente sobre o primário.

12.2.2 MEDIÇÕES

Após achar o modelo elétrico, tentamos medir a defasagem entre a corrente do primário e as tensões dos secundários, e também as amplitudes dos sinais. Assim, podemos verificar se o modelo está correto ou não. As medições para diferentes posições do ímã foram as seguintes:

Tabela 4 - Amplitude e Fase

Posição (mm)	S1		S2	
	V.Absoluto (mV)	Fase (°)	V.Absoluto (mV)	Fase(°)
5	6,55	90	83,1	76,32
10	17,5	87,84	72,5	78,48
15	30,8	86,4	61,1	80,64
20	44,1	83,52	49,9	82,8
25	56,7	82,08	38,4	84,24
30	66,8	79,92	25,5	85,68

Então, vemos que a defasagem aumenta quando os sinais do secundário são maiores.

Vemos que o modelo é dados por :

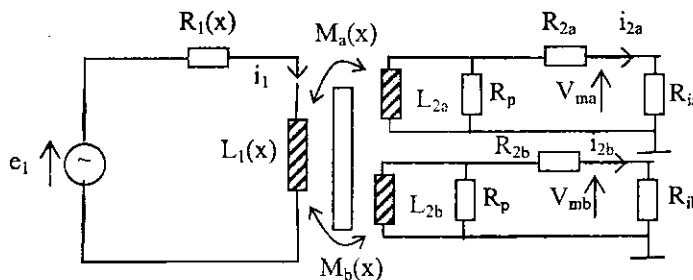


Figura 97 - Modelo do sensor com resistência paralelo R_p no secundário.

Então,

$$\triangleright V_{ma} = j\omega M_a(x) * (i_1 + i_R)$$

$$\triangleright V_{mb} = j\omega M_b(x) * (i_1 + i_R)$$

$$\triangleright I_R = -j\omega M_a(x) * i_1 / R_p$$

$$\triangleright I_R = -j\omega M_b(x) * i_1 / R_p$$

Assim :

$$\triangleright V_{ma} = j\omega M_a(x) * i_1 + (\omega M_a)^2 * i_1 / R_p$$

$$\triangleright V_{mb} = j\omega M_b(x) * i_1 + (\omega M_b)^2 * i_1 / R_p$$

Para fazer os cálculos teóricos do modelo, devemos obter os valores de M_a , M_b , i_1 e R_p . A indutância mútua M_a ou M_b pode ser calculada da seguinte maneira :

$$M_{ab} = V_{mab} / di/dt$$

Sabemos que a corrente é dada por :

$$i = I * \sin(\omega t)$$

Logo, $di/dt = I * \omega * \cos(\omega t)$. Desta forma, em valores absolutos, temos que : $di/dt = I * \omega$

Então, $M_{ab} = V_{mab} / (I * \omega)$. Assim, temos todos os dados.

Ajustamos o valor de R_p para ter menos erro entre a medida experimental e o cálculo teórico. Para este sensor, achamos o valor $R_p = 51$ Ohms.

As tabelas seguintes mostram os valores teóricos :

Tabela 5 - Valores teóricos dos sinais em função da posição

Posição (mm)	V_{ma} (mV)	V_{mb} (mV)	di/dt (mV)	Corrente (mA)	M_a (mH)	M_b (mH)
5	6.55	83.1	229.65	7.31	0.02852	0.36185
10	17.5	72.5	227.45	7.24	0.07693	0.3187
15	30.8	61.1	226.51	7.21	0.13597	0.2697
20	44.1	49.9	226.19	7.2	0.19496	0.2206
25	56.7	38.4	2226.82	7.22	0.24997	0.1692
30	66.8	25.5	227.76	7.25	0.29322	0.1119

Onde $\omega = 31415.92$ rad/s.

Os cálculos teóricos nos retornam o seguinte resultado :

Tabela 6 - Parte real e imaginária dos sinais do sensor

Posição(mm)	V_{ma}				V_{mb}			
	Re	Im	Abs(mV)	Fase(°)	Re	Im	Abs	Fase
5	0.0001151	0.00655	6.55	88.99	0.018523	0.0831	85.14	77.43
10	0.0008294	0.0175	17.52	87.29	0.014235	0.0725	73.88	78.89
15	0.0025798	0.0308	30.91	85.21	0.010152	0.0611	61.94	80.57
20	0.0052963	0.0441	44.42	83.15	0.006781	0.0499	50.36	82.26
25	0.0087308	0.0567	57.37	81.25	0.004004	0.0384	38.61	84.05
30	0.0120682	0.0668	67.88	79.76	0.001758	0.0255	25.56	86.05

Onde Re et Im são as partes real e imaginária de V_{mab} .

O erro em relação as medições experimentais são os seguintes :

Tabela 7 - Valores experimentais dos sinais do sensor

Posição (mm)	V_{ma}		V_{mb}	
	Abs (%)	Fase (%)	Abs (%)	Fase (%)
5	0.0154	1.1183	2.4541	1.4597
10	0.1122	0.6301	1.9094	0.5241
15	0.3501	1.3750	1.3711	0.0921
20	0.7186	0.4409	0.9191	0.6506
25	1.1786	1.0159	0.5423	0.2298
30	1.6188	0.2011	0.2375	0.4374
Erro médio(%)	0.6656	0.7969	1.2389	0.5656

12.2.3 CONCLUSÃO

Vimos que o modelo teórico do sensor representa bem a funcionalidade do sensor.

13 RESUMO DOS RESULTADOS

13.1 TABELA DE IMPEDÂNCIA

A primeira tabela que construímos foi a tabela de impedância máxima e mínima. Pegamos os valores máximos e mínimos das resistências e indutâncias dos sensores LVDT à 5kHz e à 10kHz para os entreferros de 0mm, 1mm, 2mm e 3mm. O valor mínimo foi retirado da metade do comprimento e o valor máximo no fim do comprimento útil, como podemos ver no gráfico seguinte¹ :

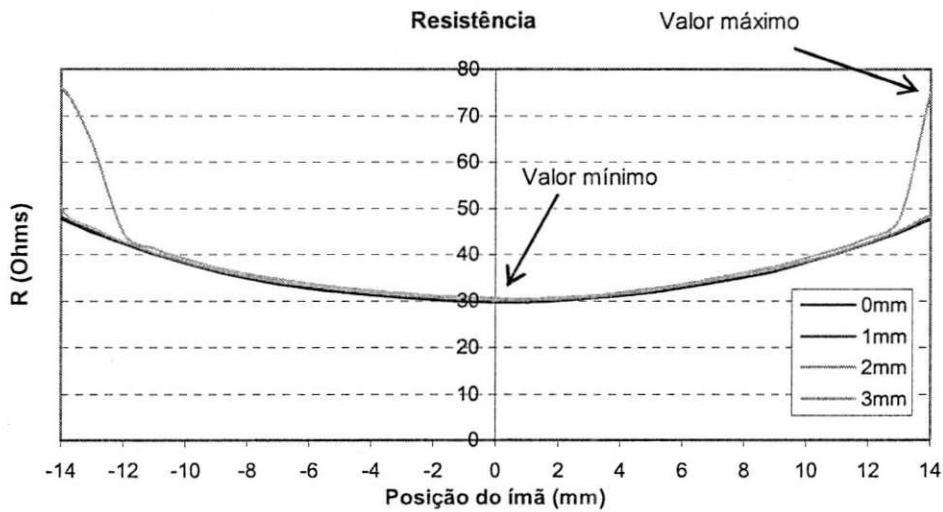


Figura 98 - Curva da resistência do primário do sensor, mostrando os parâmetros a serem analisados.

13.2 TABELA DO COMPRIMENTO ÚTIL MÁXIMO

Esta tabela mostra o comprimento útil máximo (zona monótona) que podemos ter para diferentes entreferros e para diferentes tratamentos do sinal. O gráfico seguinte mostra a zona monótona de um sinal diferencial utilizando um entreferro de 2mm :

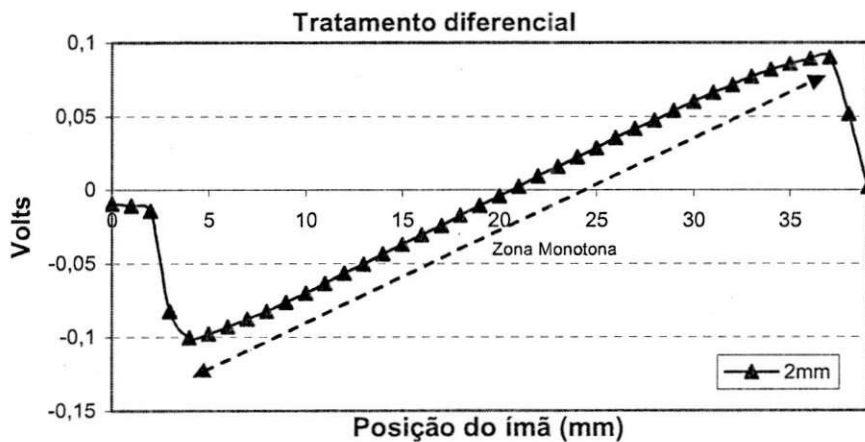


Figura 99 - Gráfico mostrando a zona monótona a ser analisada.

¹ Nós não mostramos a curva de indutância porque ela tem o mesmo comportamento da curva de resistência.

13.3 TABELA DOS SINAIS DO SENSOR

Esta tabela mostra o valor máximo ($S1_{max}$), mínimo ($S1_{min}$), a soma ($S1+S2$) e a diferença entre os valores máximo e mínimo (ΔS) das tensões eficazes das bobinas secundárias do sensor, a frequência utilizada para o experimento, o valor máximo da tensão do primário do sensor² (V_{pmax}), e a constante k , que é a relação entre a tensão máxima do primário do sensor e a soma das tensões eficazes das bobinas secundárias. Mostraremos também as impedâncias, as indutâncias mútuas mínimas e máximas na zona monótona do comprimento do sensor.

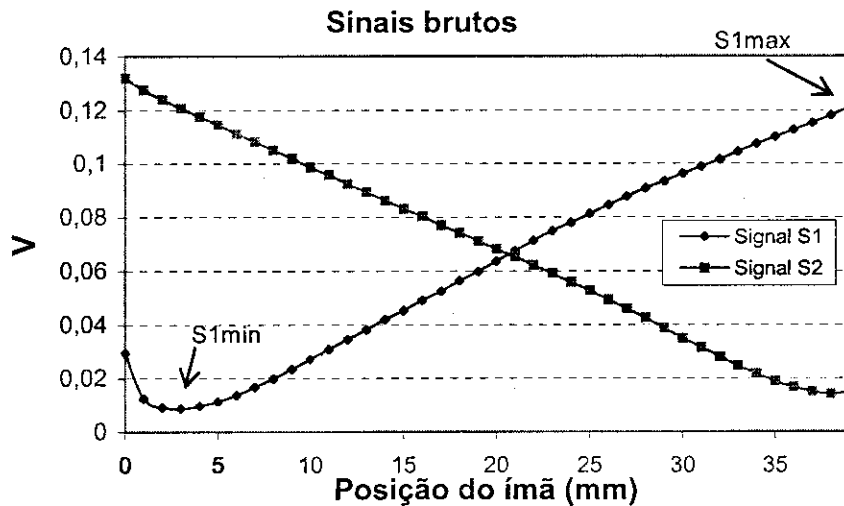


Figura 100 - Sinais brutos de cada secundário do sensor LVDT.

13.4 TABELA DAS INFLUÊNCIAS

Esta tabela mostra os efeitos de variação de entreferro, de temperatura, de frequência e de amplitude da corrente, em função do comprimento útil e do tratamento do sinal utilizado. Observamos também a não-linearidade de cada tratamento do sinal para diversos entreferros utilizados.

O comprimento útil é determinado pelo comprimento da zona monótona para cada entreferro utilizado. Por exemplo, 90% do comprimento útil para o efeito de entreferro de 0mm a 2mm corresponde à 90% da zona monótona do sinal utilizando um entreferro de 2mm.

Para a linearidade, fizemos uma aproximação por uma função linear para cada tratamento do sinal, entreferro e porcentagem do comprimento útil utilizados.

As tabelas são mostradas nas páginas seguintes.

² É a tensão da bobina primária do sensor quando utilizamos uma corrente senoidal de 7.5mA eficaz.

Tabela de impedância à 5kHz

Tabela 8 - Tabela de impedância

Maquete	Eixo	Lmax (mH)				Lmin(mH)			
		0mm	1mm	2mm	3mm	0mm	1mm	2mm	3mm
40 fil 0.08	40mm	4,5032	4,512	5,5848	6,5	1,6242	1,615	1,6228	1,655
40 fil 0.08	45mm	4,9903	4,9222	4,9155	5,0477	1,8212	1,7863	1,7621	1,7692
40 fil 0.08	50mm	5,0265	4,9584	4,9275	4,8533	1,9106	1,8636	1,8237	1,8153
40 fil 0.08	55mm	5,5644	5,504	5,3997	5,3493	2,037	1,977	1,9373	1,9027
50 fil 0.08	50mm	6,6529	6,7497	6,6377	7,2444	2,2856	2,2637	2,24	2,2586
50 fil 0.08	55mm	7,5462	7,5565	7,5301	7,4182	2,488	2,4811	2,3888	2,4645
50 fil 0.1	50mm	4,1055	4,1098	4,1214	5,217	1,8418	1,8096	1,7987	1,7811
50 fil 0.1	55mm	4,7836	4,8719	4,8726	4,8344	2,1025	2,0684	2,0513	2,0592

Tabela 9 - Tabela de impedância

Maquete	Eixo	Rmax(Ohms)				Rmin(Ohms)			
		0mm	1mm	2mm	3mm	0mm	1mm	2mm	3mm
40 fil 0.08	40mm	47,56	47,7	48,52	74,85	29,7	29,83	30,11	30,46
40 fil 0.08	45mm	49,15	48,65	48,64	49,58	29,87	29,84	29,92	29,92
40 fil 0.08	50mm	55,08	54,33	54,2	53,87	31,47	31,42	31,51	1,8152
40 fil 0.08	55mm	53,09	52,6	51,86	51,6	30,7	30,65	30,62	30,72
50 fil 0.08	50mm	82,85	84,01	82,85	100,4	38,88	38,83	39,08	39,58
50 fil 0.08	55mm	82,17	81,92	81,88	81,73	38,77	38,64	39,03	39,23
50 fil 0.1	50mm	46,8	46,84	47,41	70,79	22,41	22,45	22,63	22,91
50 fil 0.1	55mm	45,23	45,99	46,09	45,83	21,8	21,78	21,79	21,94

Tabela de impedância à 10kHz

Tabela 10 - Tabela de impedância

Maquete	Eixo	Lmax (mH)				Lmin(mH)			
		0mm	1mm	2mm	3mm	0mm	1mm	2mm	3mm
40 fil 0.08	40mm	4,1108	4,1212	4,1058	5,4953	1,5707	1,5612	1,5613	1,5817
40 fil 0.08	45mm	4,6495	4,5817	4,5591	4,6229	1,777	1,7369	1,7255	1,7404
40 fil 0.08	50mm	4,5305	4,4966	4,4892	4,395	1,8376	1,7996	1,757	1,7451
40 fil 0.08	55mm	5,1576	5,0946	5,0232	4,9041	1,9872	1,9274	1,8846	1,8513
50 fil 0.08	50mm	5,6567	5,7309	5,6762	5,9089	2,1641	2,1401	2,1128	2,1207
50 fil 0.08	55mm	6,5961	6,6259	6,636	6,64988	2,3829	2,374	2,2803	2,3455
50 fil 0.1	50mm	3,5711	3,6015	3,6088	3,9078	1,7678	1,7341	1,7194	1,6967
50 fil 0.1	55mm	4,3912	4,393	4,3862	4,3782	2,0406	2,0069	1,9895	1,9947

Tabela 11 - Tabela de Impedância

Maquete	Eixo	Rmax(Ohms)				Rmin(Ohms)			
		0mm	1mm	2mm	3mm	0mm	1mm	2mm	3mm
40 fil 0.08	40mm	86,08	86,91	87,69	144,7	36,59	36,92	37,64	38,63
40 fil 0.08	45mm	89	87,67	87,23	88,9	36,31	36,16	36,33	36,68
40 fil 0.08	50mm	101,8	100,7	101	99,34	40,38	40,39	40,51	40,88
40 fil 0.08	55mm	100,3	98,68	97,19	94,88	38,68	38,43	38,27	38,39
50 fil 0.08	50mm	157,9	159,8	158,7	176,7	50,77	51	51,35	52,58
50 fil 0.08	55mm	162,9	163,1	164,1	161,7	49,91	50,18	49,92	51,55
50 fil 0.1	50mm	90,34	91,4	92,77	111,2	32,46	32,46	32,82	33,28
50 fil 0.1	55mm	92,44	92,4	92,31	92,62	31,27	31,14	31,1	31,36

Tabela do comprimento útil máximo

Tabela 12 - Tabela do comprimento útil máximo

Comprimento Util		Entreferro								
		1mm			2mm			3mm		
Maquete	Eixo	Différentiel	Ratiométrique	di/dt	Différentiel	Ratiométrique	di/dt	Différentiel	Ratiométrique	di/dt
40 fil 0.08	40mm	27mm	25mm	27mm	25mm	23mm	24mm	19mm	19mm	19mm
40 fil 0.08	45mm	30mm	28mm	30mm	29mm	26mm	29mm	25mm	24mm	25mm
40 fil 0.08	50mm	30mm	29mm	30mm	30mm	29mm	30mm	30mm	28mm	30mm
40 fil 0.08	55mm	30mm	29mm	30mm	30mm	29mm	30mm	30mm	28mm	30mm
50 fil 0.08	50mm	36mm	33mm	36mm	33mm	31mm	33mm	29mm	28mm	29mm
50 fil 0.08	55mm	39mm	37mm	39mm	39mm	37mm	39mm	38mm	36mm	38mm
50 fil 0.1	50mm	36mm	33mm	36mm	33mm	31mm	33mm	29mm	28mm	29mm
50 fil 0.1	55mm	39mm	37mm	39mm	39mm	37mm	39mm	38mm	36mm	38mm

Tabelas dos sinais do sensor
Ip=7.5mA eficaz

Tabela 13 - Tabela dos sinais do sensor

Maquete	Eixo	Frequencia	S1max(mV)	S1min(mV)	DeltaS(mV)	(S1+S2)(mV)	Vpmax(mV)	Relação k
40 fil 0.08	40mm	5kHz	217	34	183	234	1164,03	4,97
40 fil 0.08	45mm	5kHz	299	13	286	345	1282,85	3,72
40 fil 0.08	50mm	5kHz	353	32	321	390	1312,41	3,37
40 fil 0.08	55mm	5kHz	368	35	333	380	1429,22	3,76
50 fil 0.08	50mm	5kHz	220	20	200	260	1782,94	6,86
50 fil 0.08	55mm	5kHz	260	20	240	300	1976,90	6,59
50 fil 0.1	50mm	6.5kHz	131	1,5	129,5	140	1080,31	7,72
50 fil 0.1	55mm	6.5kHz	171	10	161	173	1245,46	7,20

Maquete	Eixo	Frequencia	Rmin(Ohms)	Rmax(Ohms)	Lmin(mH)	Lmax(mH)	M1min(mH)	M1max(mH)	M1+M2(mH)
40 fil 0.08	40mm	5kHz	29,83	47,7	1,615	4,512	0,1443	0,9210	0,9931
40 fil 0.08	45mm	5kHz	29,84	48,65	1,7863	4,9222	0,0552	1,2690	1,4642
40 fil 0.08	50mm	5kHz	31,42	54,33	1,8636	4,9584	0,1358	1,4982	1,6552
40 fil 0.08	55mm	5kHz	30,65	52,6	1,977	5,504	0,1485	1,5618	1,6128
50 fil 0.08	50mm	5kHz	38,83	84,01	2,2637	6,7497	0,0849	0,9337	1,1035
50 fil 0.08	55mm	5kHz	38,64	81,92	2,4811	7,5565	0,0849	1,1035	1,2732
50 fil 0.1	50mm	6.5kHz	22,45	46,84	1,8096	4,1098	0,0049	0,4277	0,4571

Tabela das influências

Tabela 14 - Tabela das influências

% do comp. Util		Tratamento do sinal								
		Diferencial			Raciométrico			di/dt		
		100%	90%	80%	100%	90%	80%	100%	90%	80%
Entreferro	0mm à 1mm	+/-2%	+/-1%	+/-0,7%	+/-4%	+/-2%	+/-1%	+/-2%	+/-1%	+/-0,7%
	0mm à 2mm	+/-3%	+/-2%	+/-1,5%	+/-5,5%	+/-3,7%	+/-2,4%	+/-3%	+/-2%	+/-1,5%
	1mm à 2mm	+/-2,7%	+/-1,3%	+/-1%	+/-4,5%	+/-2,5%	+/-1,9%	+/-2,7%	+/-1,3%	+/-1%
	1mm à 3mm	+/-4,4%	+/-3,1%	+/-2%	+/-8%	+/-6%	+/-3,3%	+/-4,4%	+/-3,1%	+/-2%
Temperatura	-40°C et 25°C	+/-2,2%	+/-1,9%	+/-1,5%	+/-0,75	+/-0,6%	+/-0,5%	+/-2,2%	+/-1,9%	+/-1,5%
	150°C et 25°C	1%	1%	1%	0,9%	0,9%	0,9%	1%	1%	1%
	-40°C et 150°C	+/-2,5%	+/-1,75%	+/-1,5%	+/-2%	2%	2%	+/-2,5%	+/-1,75%	+/-1,5%
Frequencia	6.5kHz à 5.2kHz	+/-9,5%	+/-9%	+/-8%	+/-0,5%	+/-0,5%	+/-0,5%	+/-2,8%	+/-2,6%	+/-2,5%
Amplitude	7.5mA et 6mA	+/-10%	+/-9,5%	+/-8,7%	+/-0,1%	+/-0,1%	+/-0,1%	+/-0,5%	+/-0,5%	+/-0,35%
Linearidade	1mm	+/-1,5%	+/-1,9%	+/-1,1%	+/-2%	+/-1,3%	+/-0,8%	+/-4%	+/-1,8%	+/-1,2%
	2mm	+/-1,5%	+/-1,3%	+/-1,8%	+/-3,7%	+/-1,75%	+/-1,25%	+/-3%	+/-1,5%	+/-1%
	3mm	+/-3%	+/-1,8%	+/-1%	+/-4%	+/-2%	+/-1,2%	+/-3%	+/-1,75%	+/-1,4%

A utilização destas tabelas é importante para conhecer as características de performance do sensor LVDT sob diferentes condições de funcionamento. Assim, podemos fazer uma comparação de cada sensor com diversas configurações para uma aplicação específica.

14 ORGANIZAÇÃO

Todos os experimentos que eu fiz estão sobre forma de relatório interno no laboratório de sensores da Electricfil. Abaixo, eu listo os relatórios com título e código:

Código	Título
C04-229	Effet Température
C04-230	Impédance et Fréquence
C04-232	Paramètres Géométriques du Capteur LVDT
C04-236	Influence de limaille de fer sur l'aimant
C04-284	Tableaux résumés des résultats du Capteur LVDT
C04-307	Micro-variation d'entrefer
C04-324	Modèle Electrique du capteur LVDT
C04-331	Hystérésis

Os arquivos das medições, os dados tratados e os relatórios estão localizados na pasta seguinte (Rede EFI) :

G:\CAPTEURS\R&d\Stagiaires\Luiz Alberto

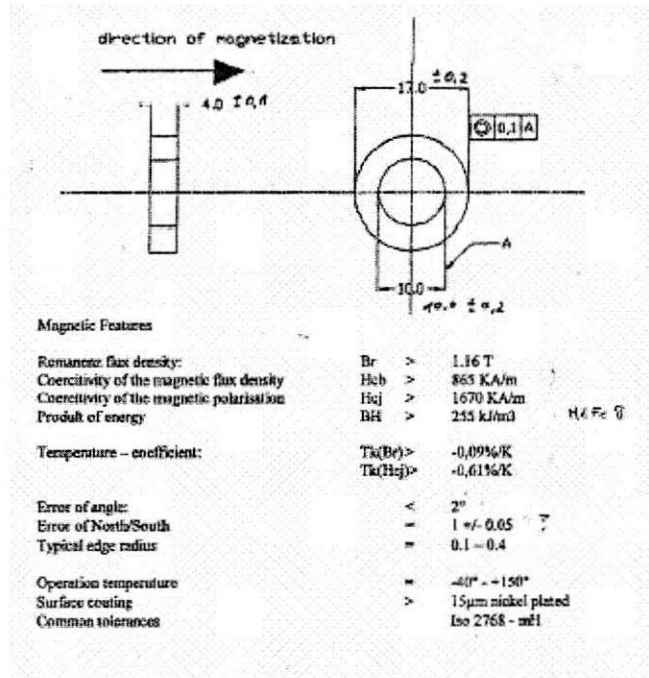
15 CONCLUSÃO

Após a realização de todos estes experimentos, vemos que percorremos grande parte do dimensionamento do sensor LVDT, e ele será muito importante para a continuação dos projetos e de suas aplicações.

A experiência profissional na Electricfil foi uma experiência única e rica nos aspectos teóricos e práticos. Ela será útil para minha futura vida profissional.

Trabalhar no « Laboratoire Capteur » foi importante porque é o coração tecnológico da indústria. Notavelmente em um mercado concorrido como é o mercado automobilístico, onde os produtos devem ser sempre mais performantes, a pesquisa de novos produtos é vital para aumentar o conforto do cliente, melhorar o rendimento do motor e melhorar o nível de segurança do automóvel.

16.2 DESENHO DO ÍMÃ UTILIZADO



3