

Práticas Laboratoriais para o Estudo de Transdutores

Laboratories Practice To Transducers Study

Francisco Granziera Júnior¹; Leandro Antonio Pasa²; Kleber Romero Felizardo²;
André Sanches Fonseca Sobrinho²

Resumo

Este trabalho consiste na criação de uma coletânea de experiências práticas com o objetivo de verificar os princípios físicos de diferentes tipos de transdutores elétricos e comparar os resultados obtidos com os modelos teóricos.

Palavras-chave: Transdutores. Sistemas Analógicos. Instrumentação Eletrônica.

Abstract

The objective of this work was to gather a collection of practical laboratory experiences, to discover the physical principles of different types of electrical transducers, and to compare them with theoretical models.

Key words: Transducers. Analog Systems. Electronic Instrumentation.

Introdução

Antigamente, o conhecimento do mundo à nossa volta restringia-se apenas a informações que pudessem ser diretamente aceitas pelos nossos órgãos de sentidos. Porém a evolução da tecnologia fez surgir uma gama de dispositivos denominados *transdutores* que estenderam a nossa capacidade de percepção (destes órgãos) de forma qualitativa e quantitativa.

Um transdutor é um sistema que transforma formas de energia para fins de medida. Ele mede uma forma de energia que está relacionada a outra através de uma relação conhecida. O transdutor é um sistema completo que produz um sinal elétrico de saída proporcional a grandeza que está sendo medida. O sensor é apenas a parte sensitiva de um transdutor (WERNECK, 1998).

Por exemplo, um microfone é um transdutor capaz de gerar um sinal elétrico em sua saída se seu diafragma for excitado por uma onda sonora.

Como exemplos de transdutores, temos os de temperatura, pressão, luz, som, gás, etc. Este trabalho apresenta uma coletânea de experiências práticas envolvendo a utilização de transdutores, visando implementar de forma simples, barata e criativa, sistemas onde seja possível levantar o comportamento de diversos tipos de transdutores e posteriormente confrontá-los com a base teórica. Todos os experimentos citados foram realizados no Laboratório de Instrumentação Biomédica do Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Estadual de Londrina no decorrer da disciplina (2ELE029) de Sensores ministrada no curso de mestrado do referido departamento.

¹ Graduado em Engenharia Elétrica na Universidade Estadual de Londrina, Mestrando do curso Engenharia Elétrica da mesma instituição. Possui trabalhos publicados nas áreas de propulsão-foguete à combustível sólido e instrumentação eletrônica embarcável. E-mail: granziera@uel.br

² Alunos de Mestrado 2003/2004 de Engenharia Elétrica UEL. E-mail: granziera@uel.br.

Os experimentos relatados realçam a utilização dos seguintes tipos de transdutores: indutivo de deslocamento, de relutância variável, de força e de temperatura. Para cada experiência é apresentada a metodologia aplicada seguida da aquisição dos dados e posterior conclusão.

Experiência 1: sensor indutivo de deslocamento

O transdutor de deslocamento consiste de um dispositivo eletromecânico baseado em indutância mútua. Quando o enrolamento primário é energizado por intermédio de uma fonte CA, devido à indutância mútua, uma tensão é induzida também no enrolamento secundário. Porém, com a introdução do núcleo de ferrite dentro destes enrolamentos, a indutância mútua e a tensão no secundário também aumentam de forma proporcional ao deslocamento do núcleo de ferrite.

Metodologia

Para esta experiência, os enrolamentos primário e secundário foram montados sobre uma seringa hospitalar e o núcleo de ferrite foi fixado na parte interna desta seringa, conforme a Figura 2.1. O enrolamento foi montado de maneira que cobrisse apenas metade da seringa. Assim, na condição inicial, o núcleo de ferrite esta totalmente fora do enrolamento. Com a introdução do núcleo no enrolamento, a indutância mútua entre os enrolamentos aumenta, fazendo a tensão de saída (enrolamento secundário) também aumentar.

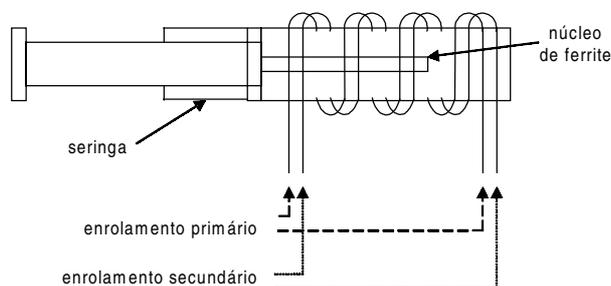


Figura 2.1 Montagem do transdutor indutivo de deslocamento

Foi montado o circuito da Figura 2.2, conforme as seguintes condições:

- Tensão de alimentação: 2V
- Frequência: 2MHz
- Resistência em série: 2kΩ
- Indutância dos enrolamento primário: 7,4mH
- Indutância do enrolamento secundário: 14mH

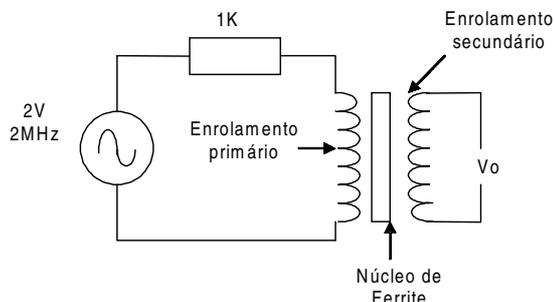


Figura 2.2 Procedimento para medição do deslocamento

Aquisição de dados

Com o circuito montado e alimentado com a tensão especificada, realizaram-se as medições. Inicialmente mediu-se a indutância com o núcleo de ferrite totalmente fora e posteriormente este foi sendo introduzido nos enrolamentos com intervalos de 1 mm, medindo-se a tensão de saída para cada intervalo. As medidas estão na Tabela 2.1. A coluna Distância da tabela indica o quanto o núcleo avançou para dentro do enrolamento.

Tabela 2.1 Medidas realizadas Distância(mm) Tensão (V)

Distância (mm)	Tensão (V)
0	2,40
2	2,50
4	2,58
6	2,72
8	2,84
10	3,04
12	3,22
14	3,44
16	3,64
18	3,84
20	4,04
22	4,26
24	4,46
26	4,62
28	4,72
30	4,78

A Figura 2.3, a seguir, mostra o gráfico que relaciona a tensão de saída (no enrolamento secundário) com a distância do núcleo de ferrite no interior da seringa.

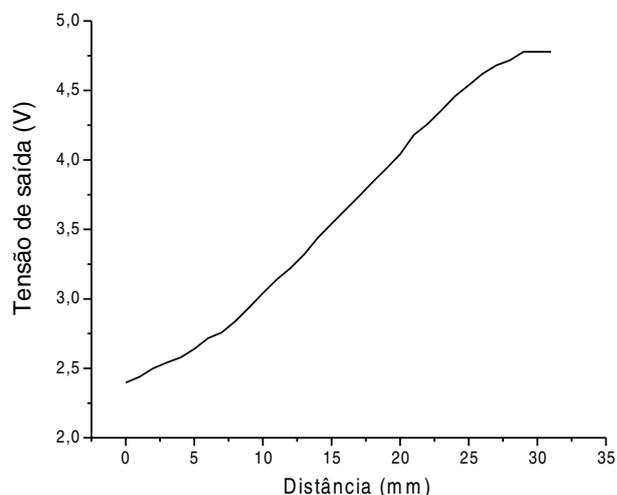


Figura 2.3 Gráfico das medidas realizadas

Conclusão

Verifica-se que a curva obtida para a tensão de saída é coerente com curvas teóricas encontradas nas referências bibliográficas (PALLÁS-ARENY; WEBSTER, 2001; WERNECK, 1998) as quais apresentam o comportamento demonstrado na Figura 2.4.

Nesta figura, diferentemente da Figura 2.3, observa-se que o eixo da tensão inicia-se em 0V.

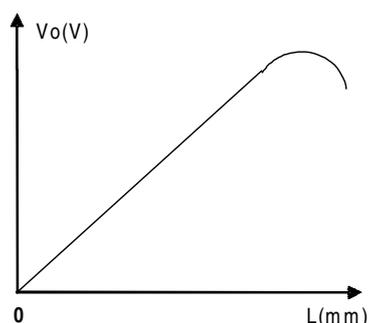


Figura 2.4 Curva teórica do sensor indutivo

Isso ocorre devido ao fato do circuito montado na Figura 2.2 já apresentar indutância mútua devido aos enrolamentos primário e secundário se

sobrepor, independentemente da existência do núcleo de ferrite no interior destes. Assim, na situação inicial, sem a presença do núcleo, a tensão no enrolamento secundário é 2.4V.

Já o circuito que gera a Figura 2.4 possui os enrolamentos separados um do outro (não se sobrepõem), sendo que a indutância mútua só ocorre quando há a presença do núcleo de ferrite no interior de ambos. Desta forma, na situação inicial sem a presença do núcleo no interior do secundário, a tensão no enrolamento secundário é 0V.

Este sensor indutivo de deslocamento encontra aplicações didáticas em estudos de Sensores, Automação industrial etc. Por exemplo: monitoramento de avanço e recuo de pistões, abertura e fechamento de válvulas, onde for necessário um controle “contínuo” de posição etc.

Experiência 2: transdutor de força utilizando um extensômetro de fio vibrante

Metodologia

Dentro dos vários métodos de medição de força ou deformação que se conhece podemos citar como mais popular os strain gages (SG). Os SG são resistores de precisão com dimensões reduzidas cuja resistência varia linearmente com a força de deformação aplicada ao objeto ao qual o mesmo está colado.

As medidas com SG são inviáveis em algumas situações. Por exemplo, se for desejado medir o quanto uma “viga de concreto” se desloca em relação a uma outra em uma construção ou em algum arranjo qualquer semelhante a esse, seria difícil aplicar o método de medir força ou pequenos deslocamentos usando um SG usual.

Pode ser utilizado em casos como este um extensômetro de fio vibrante cuja grandeza a medir é a frequência acústica gerada com um toque na linha, como numa corda de violão. A sua frequência de

oscilação (f) é proporcional à raiz quadrada da força de tração aplicada sobre o mesmo, como segue (PALLÀS-ARENY; WEBSTER, 2001):

$$f = \frac{1}{2l} \sqrt{\frac{F}{\mu}} \quad (1)$$

Onde:

- l é comprimento do fio
- μ é a densidade linear do fio, ou seja, $\mu = m/l$
- F a força de tração

A figura 3.1 mostra um arranjo montado em laboratório para verificar a relação da equação 1.

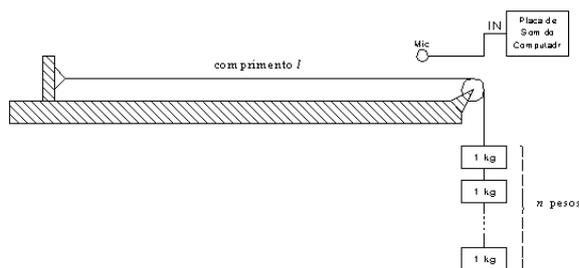


Figura 3.1 Arranjo para verificação da equação 1

Aquisição dos Dados

Neste arranjo, mostrado na figura 3.1, o comprimento do fio permanece inalterado. A força é aumentada em degraus de 1 kg cada. Para cada degrau, é feita uma perturbação na corda, com um bastão, de modo que a mesma oscile emitindo um sinal sonoro. Esse sinal sonoro é captado por um microfone e o áudio é gravado no computador utilizando um simples programa de mídia disponível em qualquer computador que possua placa de som. O sinal é gravado a uma taxa de 44100 Hz com resolução de 16 bits, ou seja, qualidade de CD, durante 3 segundos. Sobre o arquivo em formato *wav* resultante da gravação, é realizada uma DFT (Discrete Fourier Transform) de forma que a frequência de oscilação e suas harmônicas, para aquela força, seja fácil de ser identificada. A figura 3.2 ilustra a seqüência descrita.

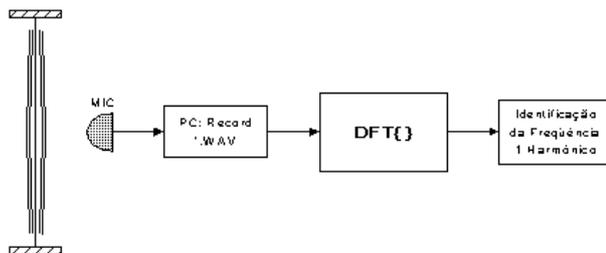


Figura 3.2 Processo de Identificação da frequência de oscilação

O gráfico da figura 3.3 ilustra o sinal de áudio coletado e sua DFT para uma força de tensionamento de 39,2 N. São várias raias, a informação de frequência pode ser extraída observando a frequência da primeira raia ou distância entre elas.

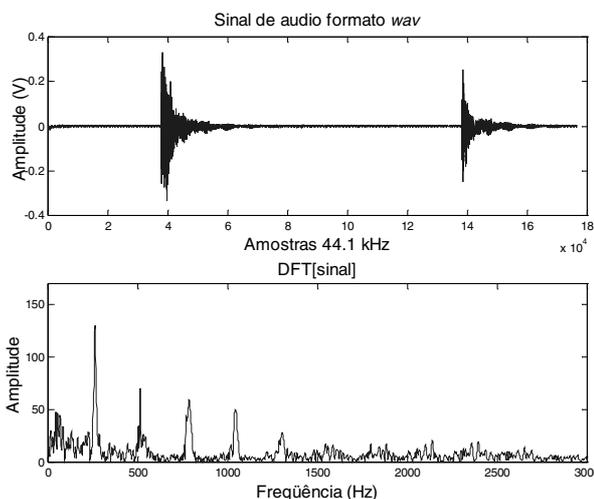


Figura 3.3 DFT de um dos sinais adquiridos

Assim, para cada 1 kgf de peso adicionado, é realizado todo um processo de medidas que resulta na tabela 3.1.

Tabela 3.1 Medidas de peso versus frequência

Peso (kgf)	Frequência medida (Hz)	Frequência calculada (Hz)	Erro (%)
9,8	262	269	2,6
19,6	355	382	7,6
29,4	440	467	6,1
39,2	502	539	7,4
49,0	571	603	5,6
58,8	626	660	5,4

Onde:

- $l = 285 \text{ mm}$
- $\mu = 414 \mu\text{g/m}$

Os dados calculados apresentam um erro em relação aos dados coletados, pois o cordão de nylon utilizado é extensível, ou seja, a densidade varia significativamente com a tensão aplicada.

O gráfico da figura 3.4 apresenta uma comparação dos valores medidos com os valores reais.

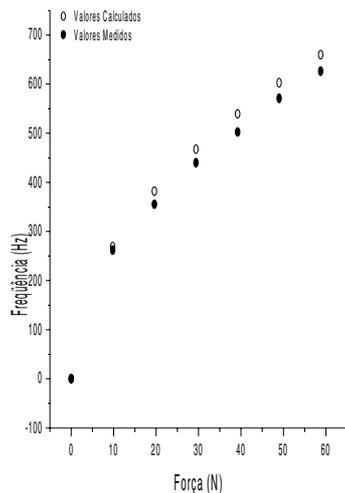


Figura 3.4 Gráfico comparativo

Conclusões

Os strain gages de fio vibrante são úteis em medidas de força, principalmente na área de construção civil. A transdução mecânica pode ser observada e comprovada de uma forma simples que pode ser montada em qualquer laboratório de sensores, bastando alguns pesos calibrados, fio de nylon e um computador provido de um software de análise matemática.

Experiência 3: verificação do comportamento do termopar via LABVIEW

Ao colocarmos dois metais diferentes em contato elétrico, haverá uma diferença de potencial entre eles, que é função da temperatura. Esse fenômeno tem o

nome de efeito termoelétrico e é utilizado para medir temperaturas num espectro bastante amplo (WERNECK, 1998).

Metodologia

O objetivo deste experimento foi fazer a aquisição de dados de temperatura via LabVIEW® de um termopar do tipo K (Chromel/Alumel), que suporta uma temperatura máxima de $1.300 \text{ }^\circ\text{C}$, possui um coeficiente de temperatura de $42 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$ e uma saída de $4,095 \text{ mV}$ a $100 \text{ }^\circ\text{C}$.

O sistema foi montado utilizando-se a placa de desenvolvimento do LabVIEW® (PCI-6024E) e o software LabVIEW®.

A faixa de temperatura testada foi de $25 \text{ }^\circ\text{C}$ a $400 \text{ }^\circ\text{C}$, e as temperaturas elevadas na junção são provocadas por uma chama de isqueiro.

Como temperatura de referência, utilizou-se um termômetro digital, cuja precisão é de $0.01 \text{ }^\circ\text{C}$. Para a temperatura ambiente, a temperatura lida no termômetro digital foi de $25.25 \text{ }^\circ\text{C}$ e a temperatura média lida no termopar foi de $25.50 \text{ }^\circ\text{C}$. Portanto, têm-se um erro de leitura de $0.25 \text{ }^\circ\text{C}$. O objetivo deste experimento foi construir um sistema de aquisição de dados com exatidão de $0.5 \text{ }^\circ\text{C}$; portanto, um erro de leitura de $0.25 \text{ }^\circ\text{C}$ está dentro do limite pré-estabelecido.

Para aquisitar a tensão na junção do termopar pelo LabVIEW®, os terminais do termopar foram conectados a uma das entradas analógicas da placa de aquisição, na configuração de *canal diferencial*. Foi ajustada a sensibilidade do termopar para este canal, cujo valor é $42 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$. Deste modo, a tensão lida neste canal é automaticamente convertida para temperatura.

A Figura 4.1 mostra a vista do diagrama de blocos do LabVIEW®. Neste diagrama é possível escolher a taxa de amostragem e o número de amostras da aquisição. No término da aquisição, os dados aquisitados são gravados em um arquivo Termopar.txt.

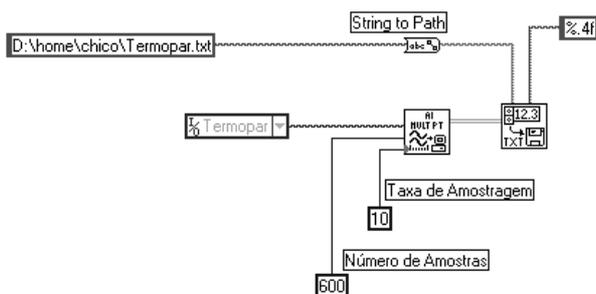


Figura 4.1 Vista do diagrama de blocos do LabVIEW

Para este experimento, a taxa de amostragem foi de 10 Hz e o tempo de aquisição foi de 1 minuto (600 amostras).

A Figura 4.2 mostra o resultado obtido.

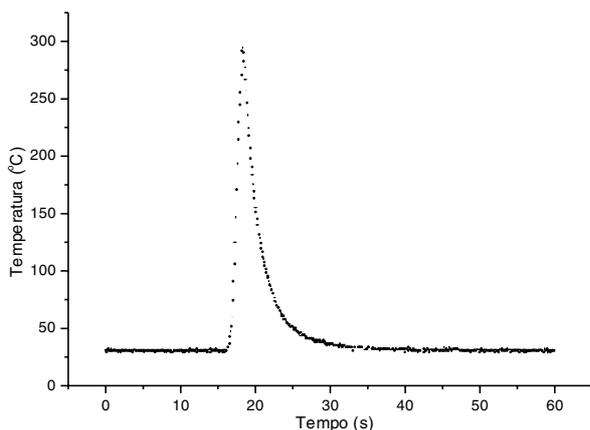


Figura 4.2 Resultados obtidos

Resultados

Durante os 15 primeiros segundos, o sensor monitorava a temperatura ambiente, cuja temperatura média estava em torno de 29 °C.

Após este instante, acendeu-se um isqueiro bem próximo à junção do termopar por apenas 2 segundos, o que gerou o pico de temperatura apresentado na Figura 4.2. O restante do tempo, o sensor ficou sujeito a temperatura ambiente.

Verifica-se que o tempo de resposta do termopar é muito rápido. O sensor obteve um tempo de resposta de 2 segundos para uma variação instantânea de temperatura de 29 °C a 290 °C.

O tempo que o termopar leva para estabilizar-se novamente, após o pico de temperatura, é mais demorado. O termopar leva 10 segundos para atingir o equilíbrio com a temperatura ambiente.

Conclusões

O LabVIEW® é um poderoso sistema para a aquisição de dados aliado ao estudo de transdutores, pois reúne na mesma ferramenta o condicionamento do sinal, a digitalização e a gravação dos dados de forma simples e precisa.

Experiência 4: sensor de relutância variável

O objetivo do experimento foi implementar um sensor para medir pequenas espessuras, da ordem de mm, de materiais não ferromagnéticos.

As medidas de espessuras, por meio de sensores de relutância variável, baseiam-se na variação do fluxo magnético, em função da variação do entreferro. Isto ocorre porque uma variação no entreferro altera a indutância do enrolamento. Assim, pode-se relacionar a indutância de um circuito magnético com a espessura do entreferro. No experimento foram utilizadas folhas de papel como entreferro.

Metodologia

Um indutor, com 24 voltas, foi enrolado em um núcleo tipo NEE 65/33/26 (conforme a Tabela 5.1) – THORNTON (THORNTON INPEC ELETRÔNICA LTDA., 2004). O fio utilizado foi o 24 AWG. Foram recortadas folhas de papel (tipo Chamex A4, com 75 g/m²), no tamanho da área transversal do núcleo. Estas foram adicionadas uma a uma no entreferro, efetuando-se as medições da indutância. Foram realizadas quatro medições.

Tabela 5.1 Parâmetros do núcleo

Comprimento efetivo (l)	147mm
Área transversal (A)	532 mm ²
Peso aproximado (pç)	193,5g
Permeabilidade do núcleo	1604 H/m

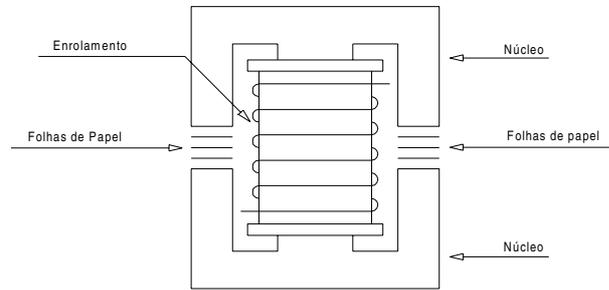


Figura 5.1 Esquema da montagem do experimento

A indutância medida e a relutância relacionam-se através das seguintes equações (PALLÁS-ARENY; WEBSTER, 2001):

$$L = \frac{N^2}{R} \quad (2)$$

Onde:

- L é a indutância
- N é o número de espiras
- R é a relutância

$$R = \frac{l}{\mu_0 \mu_r A} + \frac{l_0}{\mu_0 A_0} \quad (3)$$

Onde:

- μ_0 - permeabilidade magnética no vácuo. ($4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \frac{H}{m}$)
- μ_r - permeabilidade do núcleo.
- A - área transversal do núcleo.
- l - comprimento efetivo do núcleo.
- l_0 - caminho das linhas de campo, no entreferro.
- A_0 - área transversal do entreferro.

Aquisição dos Dados

As medidas da indutância foram obtidas através do aparelho LCR Meter, código MX-1001, da Minipa. Os resultados das medições estão representados na Tabela 5.2.

Tabela 5.2 Medidas da Indutância

Nº de Folhas	Medida 1 (µH)	Medida 2 (µH)	Medida 3 (µH)	Medida 4 (µH)
0	4340	4320	4310	4360
1	2270	1980	1880	1830
2	1290	1360	1310	1260
3	1000	1060	1070	1050
4	798	844	873	875
5	676	714	738	756
6	589	618	638	660
7	525	551	565	587
8	472	502	509	530
9	436	458	467	476
10	404	423	427	446
11	377	393	398	413

Análise dos Dados

A figura 5.2 mostra um gráfico da indutância média das quatro medições efetuadas.

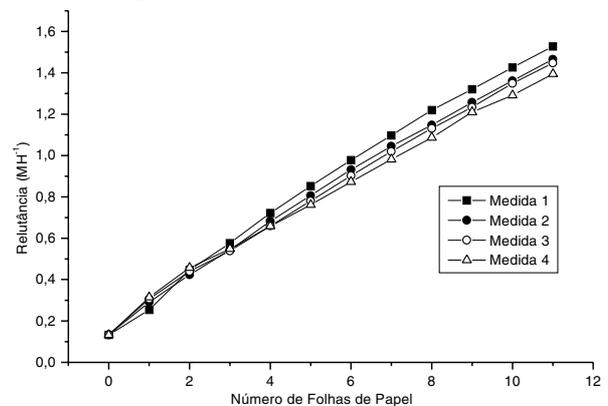


Figura 5.2 Gráfico da relutância, em função do número de folhas no entreferro.

Determinação da espessura do papel:

Utilizando-se as equações 3 e 4, determinou-se a espessura de uma folha de papel. Como $N = 24$, temos:

$$L = \frac{24^2}{R} = \frac{576}{R} \quad (4)$$

Para uma folha de papel, a indutância média medida foi: $L = 1990 \mu H$.

Assim, temos:

$$R = \frac{576}{1990 \mu} = 289447 H^{-1} \quad (5)$$

Substituindo o valor de R na equação 3:

$$R = \frac{1}{1,25664 \times 10^{-6} \cdot 1604} \cdot \frac{147 \times 10^{-3}}{532 \times 10^{-6}} + \quad (6)$$

$$\frac{1}{1,25664 \times 10^{-6}} \cdot \frac{l_0}{532 \times 10^{-6}}$$

$$137085 + l_0 \cdot 1,49581 \times 10^9 = 289447 \quad (7)$$

$$l_0 = 101,859 \mu m$$

Este valor é a medida da espessura de uma folha de papel.

Para verificar a coerência deste resultado, utilizou-se um Paquímetro Digital, marca Mitutoyo, para medir a espessura de uma resma de papel (tipo Chamex A4, com 75 g/m²). A espessura encontrada foi de 48,3 mm. Dividindo-se este valor por 500 (uma resma de papel), chega-se à espessura média de uma folha de papel: 96,6 μ m.

Verifica-se uma boa aproximação do resultado das medições, pois a diferença entre valores obtidos através da relutância e através da medida, foi de aproximadamente 5,26 μ m. Assim, temos um sensor apropriado para medições de espessuras de materiais não ferromagnéticos.

Conclusão Geral

Os experimentos apresentados geraram resultados que permitem uma aproximação razoável entre teoria e prática, fazendo com que os participantes dos experimentos ratificassem e visualizassem os conceitos teóricos abordados na disciplina de forma simples e conclusiva.

Para cada tipo de transdutor relatado, foi utilizada uma ferramenta para visualização do comportamento da grandeza física envolvida.

Entre estas ferramentas foram utilizados desde instrumentos simples como voltímetro, indutômetro, paquímetro e outros onde foi necessário um pré-processamento para visualização do sinal, entre eles o LABVIEW® e MATLAB.

Agradecimentos

A CAPES e ao CNPq pelo apoio prestado ao Mestrado e ao Depto de Engenharia Elétrica que disponibilizou o Laboratório.

Referências

- PALLÀS-ARENY, R.; WEBSTER, J. G. *Sensors and Signal Condition*. New York: John Wiley & Sons, 2001.
- WERNECK, M. M. *Transdutores e Interfaces*. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1998.
- THORNTON. *Thornton Inpec Eletrônica Ltda*. Disponível em: <<http://www.thornton.com.br>>. Acesso em: 22 mar. 2004.