

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO ESCOLA POLITÉCNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**Viabilidade Física de um Medidor de Pressão Intracorpóreo Passivo
utilizando um Circuito RLC de Escala Reduzida.**

Yves Ken Umezu

Orientador: Raul Gonzalez Lima

**São Paulo
2003**

Visto,

Raul Gonzalez Lima
8/12/2003

9.5 (Nove e meio)

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO ESCOLA POLITÉCNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**Viabilidade Física de um Medidor de Pressão Intracorpóreo Passivo
utilizando um Circuito RLC de Escala Reduzida.**

**Trabalho de formatura apresentado à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo para
obtenção do título de Graduação em Engenharia**

Yves Ken Umezu

Orientador: Raul Gonzalez Lima

**São Paulo
2003**

DEDALUS - Acervo - EPMN



31600010614

FICHA CATALOGRÁFICA

1364570
Umezu, Yves Ken

Viabilidade Física de um Medidor de Pressão Intracorpóreo Passivo utilizando um Circuito RLC de Escala Reduzida, por Y.K. Umezu. São Paulo : EPUSP, 2003.
36P.

Trabalho de formatura – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Mecânica.

1. Circuito RLC ressonante 2. Capacitância (Deflexão)
3. Medidor de Pressão Passivo I. Umezu, Yves II. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Mecânica

Índice

| | |
|-------------------------------------------------|-----------|
| 1. INTRODUÇÃO | 4 |
| 2. DESENVOLVIMENTO DO MEDIDOR DE PRESSÃO | 6 |
| 2.1. MATERIAL | 6 |
| 2.2. FORMATO | 7 |
| 2.3. MODELAGEM | 9 |
| 3. PROTÓTIPOS | 14 |
| 3.1. CONSIDERAÇÕES | 14 |
| 3.2. MATERIAL UTILIZADO | 15 |
| 3.3. DETALHES DOS PROTÓTIPOS | 19 |
| 4. TESTES | 22 |
| 4.1. METODOLOGIA E INSTRUMENTAÇÃO | 22 |
| 5. RESULTADOS | 24 |
| 6. COMENTÁRIOS FINAIS | 33 |
| 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 35 |

1. Introdução

Este projeto visa determinar a viabilidade física de um medidor de pressão intracorpóreo passivo a partir de um circuito RLC de escala reduzida, ou seja, será investigada a possibilidade de medir pressões de tecidos humanos, tais como pressão intra-ocular, tubos vasculares, e outros, a partir de um circuito RLC de dimensões reduzidas, da ordem de milímetros.

Existem já alguns medidores de pressão, como o tonômetro que são destinados a medir a pressão intra-ocular (PIO), sendo os principais: os tonômetros de indentação, os tonômetros sem contato (sopro de ar) e os tonômetros de aplanção. Dentre estes, o mais utilizado é o tonômetro de aplanção de Goldmann, por ser um método mais prático e mais confiável de medida da PIO. Entretanto o Tonômetro possui certas desvantagens tais como baixa precisão e risco de infecção no globo ocular. Outra grande desvantagem é que o preço dos tonômetros é alto, e quanto mais preciso, mais caro.



Figura 1 – Tonômetro de Aplanção

O Medidor de Pressão proposto é passivo, ou seja, a parte intracorpórea do sensor não possui fontes de energia tais como fonte de tensão. O sensor contém um ressonador passivo LC (indutor capacitor) compreendido de um capacitor de diafragma móvel e de um indutor fixo, desse modo, a frequência de ressonância do sensor é dependente da pressão. O sensor foi comparado com um modelo

eletromecânico. A pressão altera a frequência de ressonância, que pode ser detectada remotamente.

2. Desenvolvimento do Medidor de Pressão

2.1. Material

Antes do modelamento do Medidor de Pressão, vamos falar do material que será utilizado no medidor de pressão. Existem vários materiais que poderiam ser utilizados, tais como silício, diamante policristalino, materiais cerâmicos e outros.

Existem medidores de pressão que são construídos em silício. Frequentemente utilizam efeitos piezelétricos ou piezoresistivos.

A cerâmica verde seria outro material utilizável. Ele tem como propriedades:

- ⇒ Ligações iônicas fortes;
- ⇒ Isolantes térmicos;
- ⇒ Durezas extremamente elevadas;
- ⇒ Possui propriedades mecânicas proporcionais ao seu tamanho, ou seja, placas finas são muito resistentes;
- ⇒ A indústria de microeletrônica oferece um bom desenvolvimento com a cerâmica.

A fita cerâmica verde consiste de partículas de alumínio e partículas de vidro suspensas em uma junta orgânica, que é subsequenteamente prensada para formar a estrutura cerâmica. Esse tipo de fita é conhecido como LTCC (Low-Temperature cofireable ceramic).

A única deficiência deste material está na dificuldade de se trabalhar com ele, pois para este projeto será necessário montar uma bobina em forma de espiral acima do capacitor como será mostrado mais adiante. E no caso, quanto mais espiras houver melhor será a resposta do medidor. Portanto a construção deste equipamento requer precisão, principalmente porque este instrumento irá ter escala reduzida.

2.2. Formato

O sensor consiste de dois diafragmas, separados por uma cavidade selada e com vácuo de tamanho de abertura t_g .

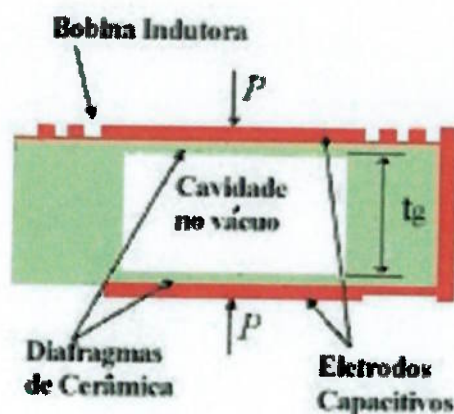


Figura 2 – Esquema em Corte

Os diafragmas e a cavidade formam o capacitor. Se a pressão P é aplicada, a distância entre as duas membranas será reduzida e a capacitância aumenta. O capacitor é conectado à bobina indutora espiral plana (Figura 3). Estes componentes formam um ressonador passivo LC com a frequência de ressonância f_0 , que é dependente da pressão. Para se obter a telemetria passiva sem fio, o sensor é colocado dentro da região de influência de uma bobina externa (antena), e então, a impedância da bobina antena são medidos como função da frequência.

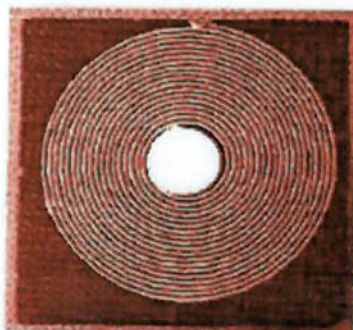


Figura 3 - Vista de cima do Sensor

Os sensores podem ser feitos utilizando múltiplas lâminas de fita cerâmica, que consiste de partículas de alumínio e de vidro suspensas em uma junta orgânica. A estrutura do sensor é composta por três seções (Figura 3). As seções de cima e de baixo formam as membranas da estrutura mecânica. A seção do meio contém um furo circular de raio a para formar a cavidade.

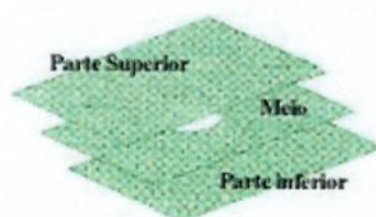


Figura 4 – Seções da Estrutura do Sensor

2.3. Modelagem

O modelo eletromecânico do medidor de pressão será desenvolvido em três passos.

1. A deflexão no centro d_0 nas membranas em função da pressão aplicada P .
2. A capacitância (dependente da pressão) $C_s(P)$ é calculada como função de d_0 . Esta capacitância determina a frequência de ressonância do sensor.
3. Finalmente, o sistema Antena-Sensor é analisado.

A deflexão dos diafragmas é calculada usando a teoria das placas planas, cujos efeitos de torção e alongamento dos diafragmas são considerados. Foram feitas diversas hipóteses:

- ☐ As bordas do diafragma são justas e podem ser modeladas por condições de limite internas;
- ☐ Não há tensão residual nos diafragmas e o resto do sensor é fabricado do mesmo material;
- ☐ Os diafragmas são sujeitas à carga uniforme P .

O modelo do sensor é mostrado na figura 5.

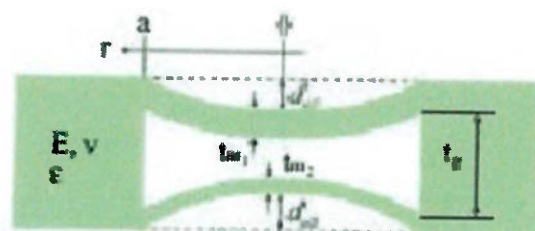


Figura 5 - Esquema do Modelo Utilizado

Levando em conta as premissas e utilizando a teoria de deflexão para placas circulares, a deflexão em qualquer ponto da placa é dada por:

$$d = d_o \left(1 - \frac{r^2}{a^2} \right)^2 \quad (1)$$

Onde r é a distância do centro, a é o raio da placa e d_o é a deflexão no centro do sensor, o qual é dado pela equação:

$$\frac{d_o}{t_m} + 0,488 \left(\frac{d_o}{t_m} \right)^3 = \frac{3P(1-\nu^2)}{16E} \left(\frac{a}{t_m} \right)^4 \quad (2)$$

Onde E é o módulo de Young, t_m é a espessura do diafragma e ν é a relação de Poisson da placa.

A máxima deformação permitida por deformação plástica ou por ruptura da placa é determinada por:

$$\varepsilon_{\max} = \frac{32d_o^2}{27a^2} \quad (3)$$

A partir da deformação máxima (propriedade do material), obtemos a máxima altura da cavidade (t_g). Utilizando as equações (2) e (3), assim como as condições impostas por fabricação, os parâmetros ótimos (por exemplo t_g , t_m , a) podem ser calculados para um intervalo de pressão. Ou ainda, para tais parâmetros podemos calcular a faixa mensurável de pressão do nosso medidor.

O capacitor C_s consiste dos eletrodos de cima e de baixo separados pelos diafragmas e a cavidade. A capacitância a pressão zero é dada por:

$$C_o = \frac{\varepsilon_o \pi a^2}{t_g + 2t_m \varepsilon_r^{-1}} \quad (4)$$

Onde ϵ_r é a constante dielétrica relativa do material dos diafragmas. A capacitância dependente da pressão é dada por:

$$C_s(P) = C_o \sum_{i=0}^{\infty} \frac{1}{2i+1} \left(\frac{2d_o}{t_g + 2t_m \epsilon_r^{-1}} \right)^i \quad (5)$$

A ressonância do sensor e sua relação com a antena são modeladas a partir da teoria dos transformadores (Figura 6).

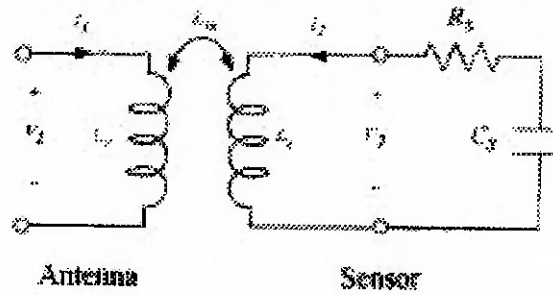


Figura 6 – Circuito Equivalente do Modelo Elétrico

A frequência de ressonância do sistema, que é igual a um circuito em série RLC ressonante, é dada por:

$$f_o = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{1}{\sqrt{L_s C_s}} \right) \quad (6)$$

A impedância de entrada da antena é expressa com os parâmetros elétricos do sensor. Da teoria dos transformadores e das leis de Kirchhoff, temos a equação da impedância de entrada, que é dada por:

$$Z_1 = \frac{V_1}{I_1} = j2\pi f L_a \left[1 + k^2 \frac{\left(\frac{f}{f_o} \right)^2}{1 - \left(\frac{f}{f_o} \right)^2 + \frac{1}{Q} j \frac{f}{f_o}} \right] \quad (7)$$

Sendo que:

e

$$k = L_m (L_a L_s)^{-1/2}$$

$$Q = 2\pi f_o L_s / R_s$$

Onde L_a é a indutância da antena, L_s a indutância do sensor, L_m a indutância mútua, C_s a capacitância do sensor, R_s a resistência do sensor e f é a frequência imposta pela antena.

Isto resulta a relação da frequência de ressonância f_o do sensor com a quantidade mensurável Z_1 .

Então resumindo:

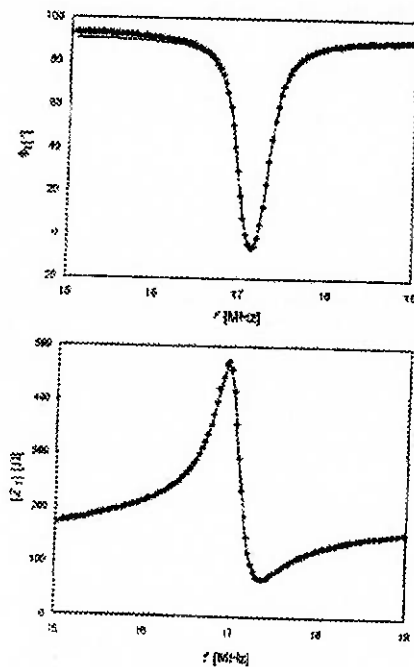
1. Impomos o sistema a uma certa tensão alternada com uma frequência já pré-definida;
2. Medimos a impedância na antena (Z_1), para obtermos a frequência de ressonância f_o a partir de (7);
3. Então, estimamos a capacitância do sensor C_s utilizando (6);
4. Da capacitância calculamos a deflexão no centro do diafragma d_o por (5);
5. Por fim obtemos a pressão a partir de (2).

Podemos também obter a frequência de ressonância por um outro método, pela frequência mínima. A frequência mínima é onde a fase da impedância Z_1 é mínima. Para obter esta frequência matematicamente, basta pegarmos a equação (7) e fazermos a expansão de Taylor:

$$f_{\min} = f_o \left(1 + \frac{k^2}{4} + \frac{1}{8Q^2} \right) \quad (8)$$

Se calcularmos a relação da frequência mínima com a frequência de ressonância, veremos que a frequência mínima é pouco maior que a frequência de ressonância, sendo função, principalmente, das indutâncias das bobinas. Então, se pudermos fazer uma varredura da frequência pela impedância, ou seja, se para cada

frequência medirmos uma impedância e sua respectiva fase, podemos obter a frequência de ressonância, a partir da frequência mínima (Figuras 7a, 7b).



Figuras 7a, 7b – Fase/Magnitude vs Frequência

3. Protótipos

Neste capítulo será abordado o protótipo, desde as considerações impostas até a sua construção. Foram feitos três diferentes protótipos, cada um feito de materiais ou com formatos diferentes, mas somente o último pôde ser testado.

3.1. Considerações

- ☐ O protótipo terá dimensões da ordem de centímetros;
- ☐ O material utilizado será diferente, por motivos de custo, facilidade de construção e tempo disponível;
- ☐ O formato também será diferente, porém terá de atender à modelagem anteriormente feita;
- ☐ O protótipo não será avaliado em tecidos humanos, ou seja, não será feita uma abordagem intracorpórea;
- ☐ Como será apenas um protótipo, de tamanho, materiais e formatos diferentes, não será avaliada a precisão, e sim o comportamento do protótipo;

3.2. Material Utilizado

Para a construção dos protótipos foram considerados diversos materiais. Os três protótipos eram diferentes somente na parte do capacitor, ou seja, a bobina dos três é o mesmo. O capacitor do primeiro protótipo era composto pelos seguintes materiais:

- Placas de Cobre;
- PVC;
- Borracha;



Figura 8 – Capacitor do Primeiro Protótipo

O cobre apresenta as seguintes vantagens:

- Pequena Resistividade. Somente a prata tem valor inferior, porém o seu elevado preço não permite o seu uso em quantidades grandes;
- Características mecânicas favoráveis;
- Baixa oxidação para a maioria das aplicações. O cobre oxida bem mais lentamente, perante elevada umidade, do que diversos outros metais; essa

oxidação, entretanto, é bastante rápida quando o metal sofre elevação de temperatura;

- Fácil deformação a frio e a quente. É relativamente fácil reduzir a seção transversal do cobre, mesmo para fios com frações de milímetros de diâmetro.

Destaque-se que a condutividade elétrica do cobre é muito influenciada na presença de impurezas, mesmo em pequenas quantidades. Essa influência é tanto maior quanto mais distribuída estiver a impureza na massa do cobre, pois sua presença reduz acentuadamente a mobilidade dos elétrons. O cobre resiste bem à ação da água, de fumaça, sulfatos, carbonatos, sendo atacado pelo oxigênio do ar e, em presença deste, ácidos, sais e amoníacos podem corroer o cobre.

O PVC foi utilizado porque ele é isolante e, além disso, pode-se achar facilmente tubos de PVC. Ele é rígido o suficiente para suportar a pressão.

A borracha foi colocada por fora, revestindo o PVC a fim de se garantir vedação, ou seja, para garantir que não houvesse nenhum outro material a não ser ar entre as placas do capacitor. Deste modo a capacitância seria alterada somente pelo ar interno, devido à sua constante dielétrica.

$$C = k.C_o \quad (9)$$

O dielétrico influencia a capacitância como uma constante dielétrica, ou seja, é um fator multiplicativo da capacitância original. A constante dielétrica do ar é 1,00059. Portanto, somente o ar não iria influenciar tanto a capacitância.

O segundo capacitor era composto pelos seguintes materiais:

- Alumínio;
- PVC;
- Borracha.



Figura 9 – Capacitor do Segundo Protótipo

Entre as placas do capacitor foram mantidos o PVC e a borracha, porém as placas eram de alumínio.

O alumínio é o segundo metal mais usado na eletricidade, havendo nos últimos anos uma preocupação permanente em substituir mais e mais as aplicações do cobre pelo alumínio. O peso específico do alumínio é bem menor que a do cobre. Tornando o segundo protótipo bem mais leve que o primeiro.

O terceiro Protótipo foi feito com os seguintes materiais:

- Alumínio;
- Papel.



Figura 10 – Capacitor do Terceiro Protótipo

O terceiro capacitor tinha papel entre as placas, diminuindo a distância entre elas.

As bobinas, comuns aos três protótipos, utilizaram:

- Plástico;
- Fios magnéticos;
- PVC;
- Verniz;

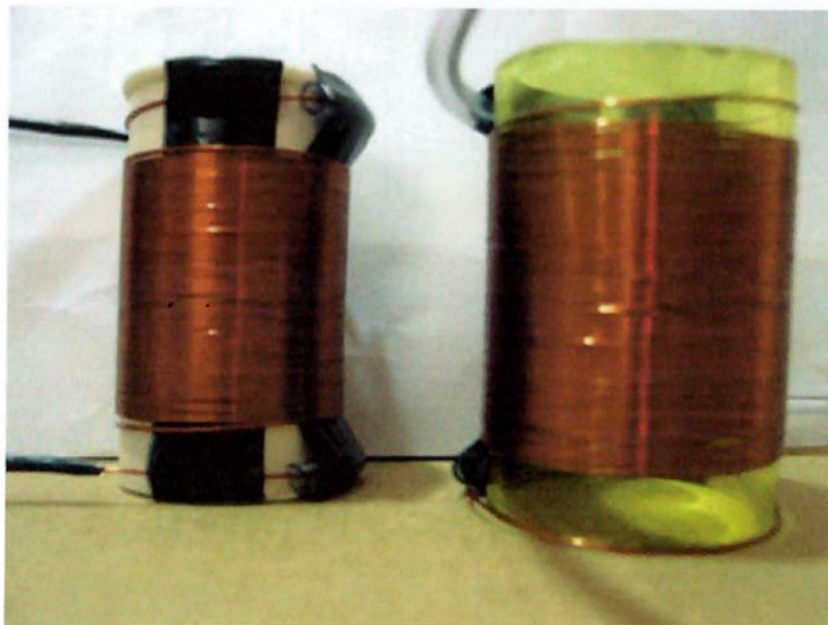


Figura 11 - Bobinas

Foi passado verniz sobre as bobinas para a fixação dos fios magnéticos. Ambos possuem a mesma quantidade de espiras, mas com áreas das seções transversais diferentes.

3.3. Detalhes dos Protótipos

O primeiro capacitor não foi utilizado, pois o módulo de elasticidade do cobre é muito alto ($E = 13000 \text{ kgf/mm}^2$), ou seja, seria necessária uma pressão muito alta para se ter uma boa deflexão. Então, foi construído o segundo capacitor, de alumínio, o qual possui módulo de elasticidade é menor ($E = 7000 \text{ kgf/mm}^2$), e também é um ótimo condutor. Assim para uma mesma deflexão, seria necessário quase o dobro de tensão para o cobre em relação ao alumínio.

Para o dimensionamento do segundo protótipo foram obtidos, a partir de referências bibliográficas, os seguintes dados:

$$E = 7000 \text{ kgf/mm}^2;$$

$$\nu = 0,25;$$

$$\epsilon_{\text{MAX}} = 0,002;$$

$$t_m = 1 \text{ mm}.$$

Supondo que $a = 17,75 \text{ mm}$, e utilizando a equação (3) chegamos que:

$$tg_{\text{MIN}} = 0,73 \text{ mm}$$

Então, podemos estimar pela equação (2) que a pressão máxima que este medidor irá medir será de $0,376 \text{ bar}$ ou $37593,14 \text{ Pa}$.

Calculamos as indutâncias por:

$$L = \frac{\mu_o \cdot N^2 \cdot A}{l} \quad (10)$$

Onde μ_o é a permeabilidade do vácuo ($\mu_o = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Wb/A.m}$), N o número de espiras, A a área da seção transversal e l o comprimento da bobina.

A indutância da antena nos resulta:

$$L_1 = 0,1299032 \text{ mH}$$

A indutância do sensor:

$$L_2 = 0,1919026 \text{ mH}$$

E a indutância mútua pode ser calculada por:

$$M = \frac{N_2 \cdot N_1 \cdot \mu_o \cdot A_1}{l_1} \quad (11)$$

Chegando a:

$$M = 0,1384215 \text{ mH}$$

A partir do capacitor (segundo protótipo), podemos calcular a capacitância a pressão zero (nula):

$$C = \epsilon_o \cdot \frac{A}{d} \cdot k \quad (12)$$

Esta equação é válida para capacitores de placas planas. Onde ϵ_o é a permissividade no vácuo ($\epsilon_o = 8,8542 \cdot 10^{-12} \text{ C}^2/\text{N.m}^2$), A área da placa, d a distância entre as placas e k o valor da constante dielétrica ($k_{ar} = 1,00059$).

Isto nos resulta:

$$C = 4,38244 \cdot 10^{-12} \text{ F}$$

Sabemos também que para obter a pressão do medidor, precisamos alcançar a frequência de ressonância do sistema. Portanto utilizando a equação (6) chegamos que a frequência de ressonância do sistema é:

$$f_0 = 5,488 \text{ MHz}$$

Portanto, teoricamente, se fizermos o teste a pressão zero, a frequência de ressonância teria que ser igual a 5,488 MHz. Porém a fonte de tensão alternada disponível não conseguiu chegar nem a 1 MHz de frequência.

Então, a solução encontrada foi a construção de um outro protótipo que tomasse a frequência de ressonância do sistema possível de ser alcançada.

O terceiro protótipo foi construído com duas lâminas de alumínio. Estas lâminas foram coladas uma à outra, separadas por um papel. Como o formato mudou, as equações de placas planas circulares já não foram mais válidas, então não foi possível dimensionar a pressão máxima e nem a frequência de ressonância do sistema (a pressão nula). Mas segundo a equação (12), podemos afirmar que a capacitância irá diminuir muito devido à aproximação das placas. Assim, se a capacitância diminui, e segundo a equação (6), concluímos que a frequência de ressonância decairá muito, menor a 700 kHz, possibilitando as medidas.

4. Testes

Os testes foram feitos com o terceiro protótipo. Como as equações de placas circulares planas não foram mais válidas, o objetivo dos testes foi o estudo do comportamento do medidor, já que o segundo protótipo dimensionado não pôde ser utilizado para testes devido ao equipamento indisponível.

4.1. Metodologia e Instrumentação

Inicialmente o projeto propunha que os testes iriam ser feitos na água, para simular a pressão, entretanto a pressão foi aplicada por uma ferramenta (“sargento”). Por este motivo os dois primeiros protótipos tiveram como isolante o PVC e a borracha, para garantir que não entrasse outros materiais entre as placas, como por exemplo, a água.

Para se fazer os testes foram utilizados um osciloscópio, um multímetro e uma fonte de tensão alternada. O uso do osciloscópio foi devido principalmente ao fato do multímetro não ter resolução o suficiente para a obtenção das medidas de tensão do sistema. Tentou-se colocar amplificadores, porém a resposta não melhorou. Por fim a melhor solução foi a utilização de um osciloscópio.

Primeiramente ligamos o osciloscópio no sensor certificando que havia corrente induzida neste. Então ligamos a fonte de tensão alternada, que fornece uma tensão de 3V ($V_{\text{média quadrática}}$). Após a confirmação de corrente induzida, passamos o osciloscópio para a antena. Medimos a corrente média quadrática com o multímetro. O osciloscópio nos mostrou o perfil de tensão e, assim, mensuramos a tensão (V_{PP}).

A partir da tensão e da corrente foi possível calcular a impedância. Variando-se a frequência, obtemos uma impedância diferente. Então, fizemos uma varredura. A partir do perfil (gráfico) da impedância com a frequência foi possível obter a frequência de ressonância do sistema. E a frequência de ressonância nos resultaria a pressão correspondente.

Primeiramente obtemos a capacitância à pressão nula.

Então, foram feitos testes com pressão não nula, utilizado-se uma ferramenta, “sargento”, para aplicar a pressão. E para torná-la mais uniforme o sargento pressionou as placas do capacitor através de uma placa de alumínio mais espessa e maior.

5. Resultados

A figura 12 mostra a bancada e o começo dos testes. Foi observada a corrente induzida no sensor para assegurar o funcionamento das bobinas e do circuito.

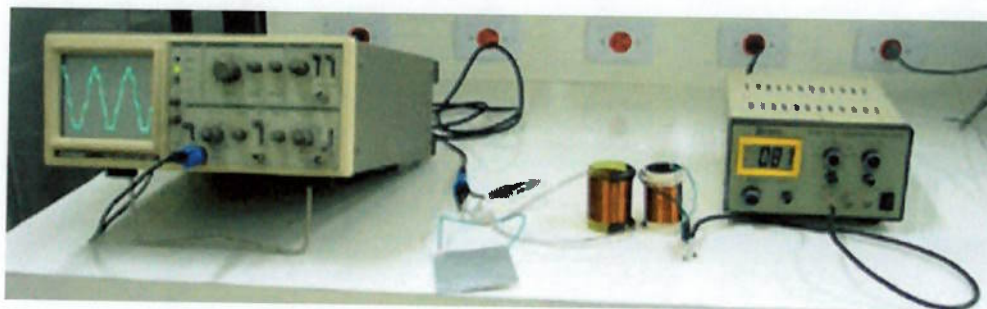


Figura 12 – Bancada com verificação da corrente induzida

A seguir, uma foto da tensão “induzida” no sensor.

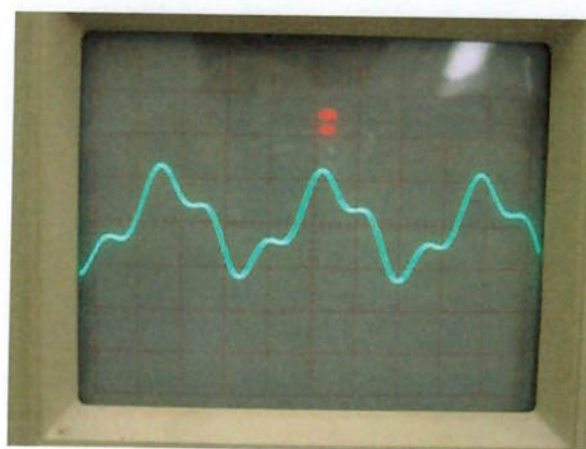


Figura 13 – Tensão “Induzida” na Frequência 81 kHz

Agora em uma frequência maior:

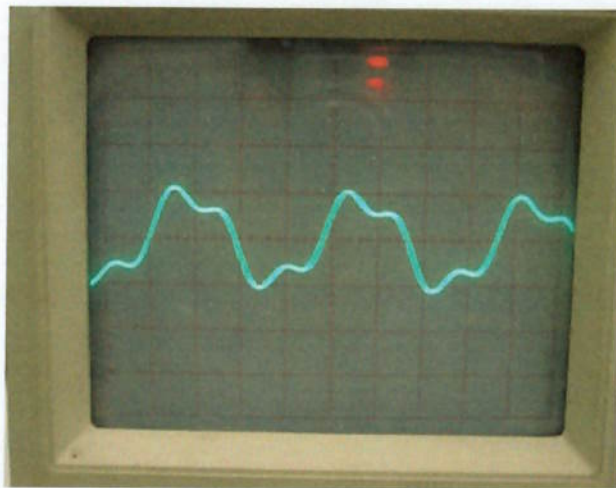


Figura 14 – Tensão "Induzida" a uma Frequência maior que 81 kHz

E a uma frequência menor que 81 kHz.

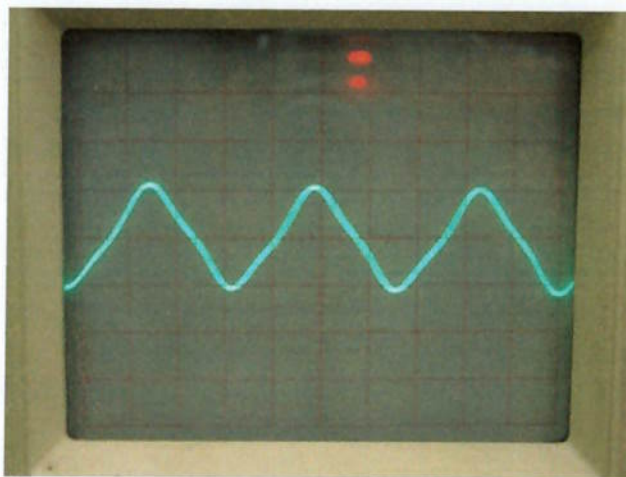


Figura 15 – Tensão "Induzida" a uma Frequência menor que 81 kHz

Este comportamento nos comprova o funcionamento de um circuito RLC em série cuja tensão obedece à seguinte equação:

$$V_m = \sqrt{V_R^2 + (V_L - V_C)^2} \quad (13)$$

Onde V_R é a tensão equivalente à resistência do circuito, V_L a tensão da bobina e V_C a tensão do capacitor. Então variando-se a frequência da fonte de tensão alternada temos uma variação da tensão total do sensor.

Verificado o funcionamento do circuito do sensor, pôde-se começar os testes da antena.



Figura 16 – Osciloscópio e Multímetro Ligados à Antena

Com o osciloscópio e o multímetro ligados à antena, e aplicando nenhuma pressão (pressão nula) obtemos os seguintes dados:

| V_1 [V] | f [kHz] |
|-----------|-----------|
| 0,55 | 72 |
| 0,602 | 82 |
| 0,685 | 103 |
| 0,727 | 112 |
| 0,76 | 133 |
| 0,77 | 145 |
| 0,8 | 188 |
| 0,78 | 208 |
| 0,775 | 217 |
| 0,76 | 227 |
| 0,74 | 251 |
| 0,73 | 262 |
| 0,725 | 275 |
| 0,7 | 296 |
| 0,685 | 309 |

| V_1 [V] | f [kHz] |
|-----------|-----------|
| 0,64 | 331 |
| 0,61 | 355 |
| 0,59 | 368 |
| 0,56 | 391 |
| 0,54 | 415 |
| 0,5 | 457 |
| 0,48 | 480 |
| 0,46 | 508 |
| 0,44 | 552 |
| 0,42 | 583 |
| 0,405 | 630 |
| 0,39 | 655 |
| 0,38 | 685 |
| 0,36 | 725 |

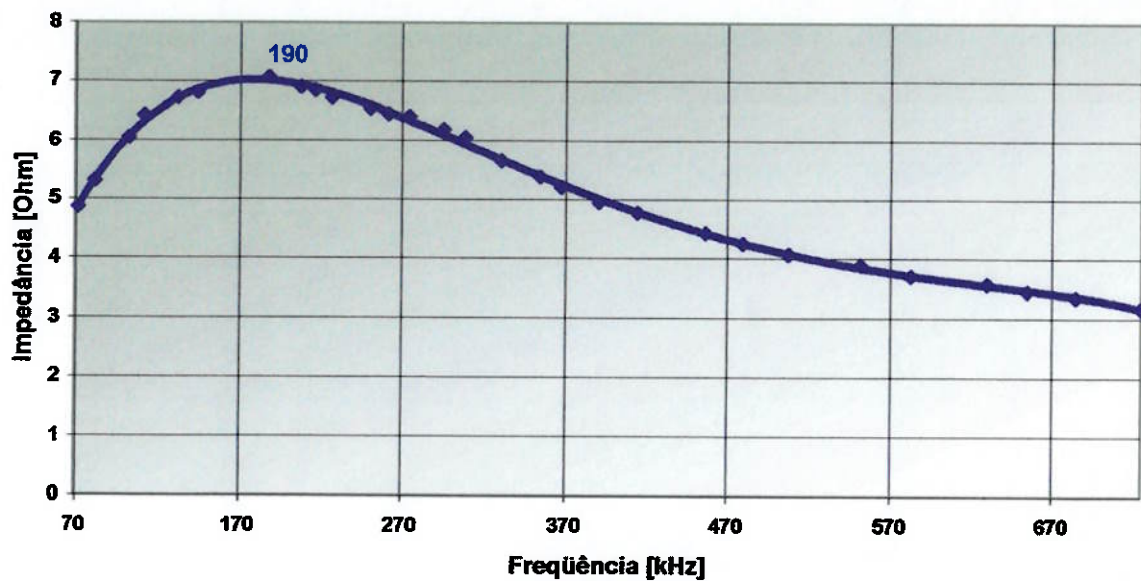
Onde V_1 é a tensão pico a pico da antena. Para a pressão nula obtemos a corrente da antena igual a:

$$I_{mq} = 40 \text{ mA}$$

Utilizando a seguinte equação:

$$Z = \frac{V_{mq}}{I_{mq}} = \frac{\frac{V_m}{\sqrt{2}}}{I_{mq}} = \frac{\frac{V_{pp}}{2\sqrt{2}}}{I_{mq}} \quad (14)$$

Chegamos ao seguinte gráfico:



Podemos observar, então, que a frequência de ressonância é em torno de 190 kHz. Nesta frequência a impedância vale mais ou menos 7,05 ohms. Na frequência de ressonância a impedância da bobina e do capacitor é o mesmo. Então da equação:

$$V_{mq} = I_{mq} \cdot \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} \quad (15)$$

Obtemos o valor da resistência da antena que vale, portanto, 7,05 ohms.

Seguindo a equação (6) chegamos que o valor da capacitância vale:

$$C_s = 3,656 \cdot 10^{-9} \text{ F} = 3,656 \text{ } \mu\text{F}$$

Então, esta capacitância é válida para pressão nula.

Podemos também calcular o valor da distância real entre as placas seguindo a equação (12). Resulta:

$$d = 0,019377 \text{ mm}$$

Vamos verificar também se o valor da frequência mínima é próximo do valor da frequência de ressonância. Da equação (8) chegamos que:

$$F_{\text{MIN}} = 226,5 \text{ kHz}$$

Para este cálculo foi considerado a resistência do sensor sendo igual a 1 ohm (valor previamente medido no sensor).

Esta frequência é 19% maior que a frequência de ressonância, não tão próximo quanto o esperado. Este resultado depende das indutâncias do sensor e da antena.

É de se ressaltar que esta frequência não é a frequência onde o valor da impedância é menor, e sim onde a fase da impedância é menor. Pois a impedância deve seguir a equação (16).

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} \quad (16)$$

Agora, vamos para os testes à pressão não nula.

| V₁ [V] | f [kHz] |
|--------------------------|----------------|
| 0,5 | 70 |
| 0,56 | 85 |
| 0,62 | 100 |
| 0,67 | 115 |
| 0,69 | 130 |
| 0,71 | 145 |
| 0,73 | 175 |
| 0,725 | 205 |
| 0,72 | 220 |
| 0,71 | 235 |
| 0,69 | 250 |
| 0,67 | 265 |
| 0,66 | 280 |
| 0,65 | 295 |
| 0,62 | 310 |
| 0,6 | 330 |
| 0,57 | 350 |
| 0,54 | 370 |
| 0,52 | 390 |
| 0,49 | 420 |
| 0,46 | 450 |
| 0,45 | 480 |
| 0,43 | 510 |
| 0,41 | 550 |
| 0,385 | 590 |
| 0,375 | 630 |
| 0,365 | 650 |
| 0,355 | 685 |
| 0,325 | 725 |

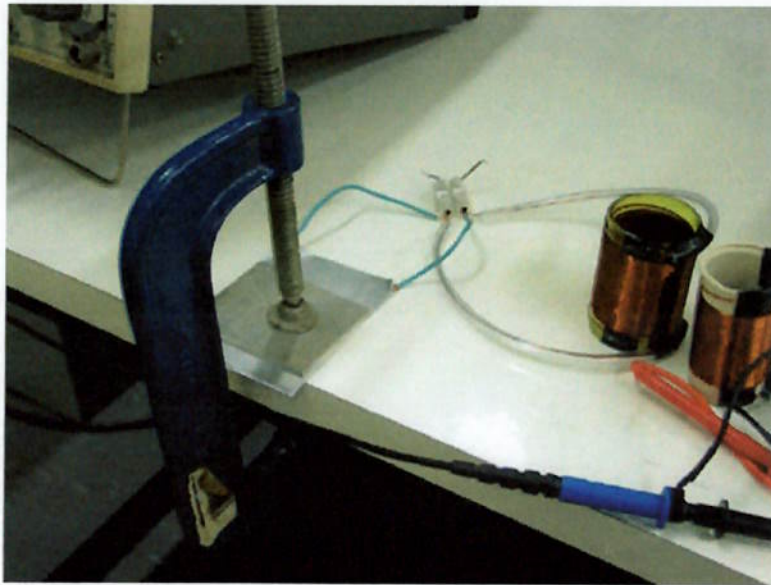
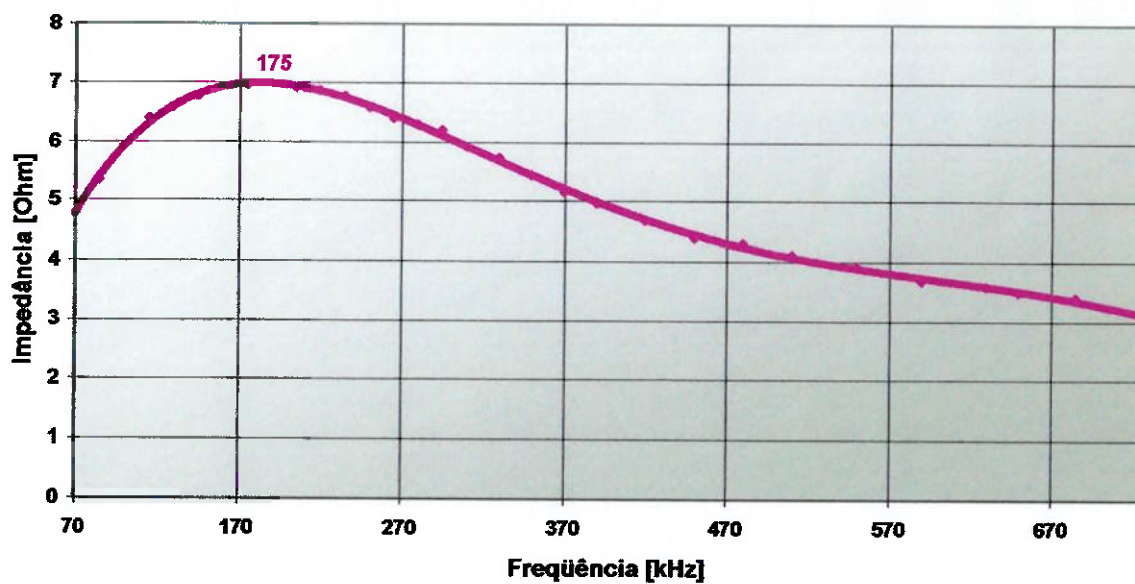


Figura 17 – Aplicação da Pressão com um “Sargento”

Com estes dados obtemos o seguinte gráfico:



A partir destes dados chegamos que a frequência de ressonância vale em torno dos 175 kHz. Esta frequência de ressonância nos dá o valor da capacitância:

$$C_s = 4,31 \cdot 10^{-9} \text{ F} = 4,31 \text{ } \mu\text{F}$$

Esta capacitância é válida para pressão não nula. Podemos também calcular o valor da distância real entre as placas seguindo a equação (12). Isto nos resulta:

$$d' = 0,016436 \text{ mm}$$

A distância entre as placas nos permite estimar a deflexão gerada pela pressão que vale:

$$d - d' = 0,002941 \text{ mm}$$

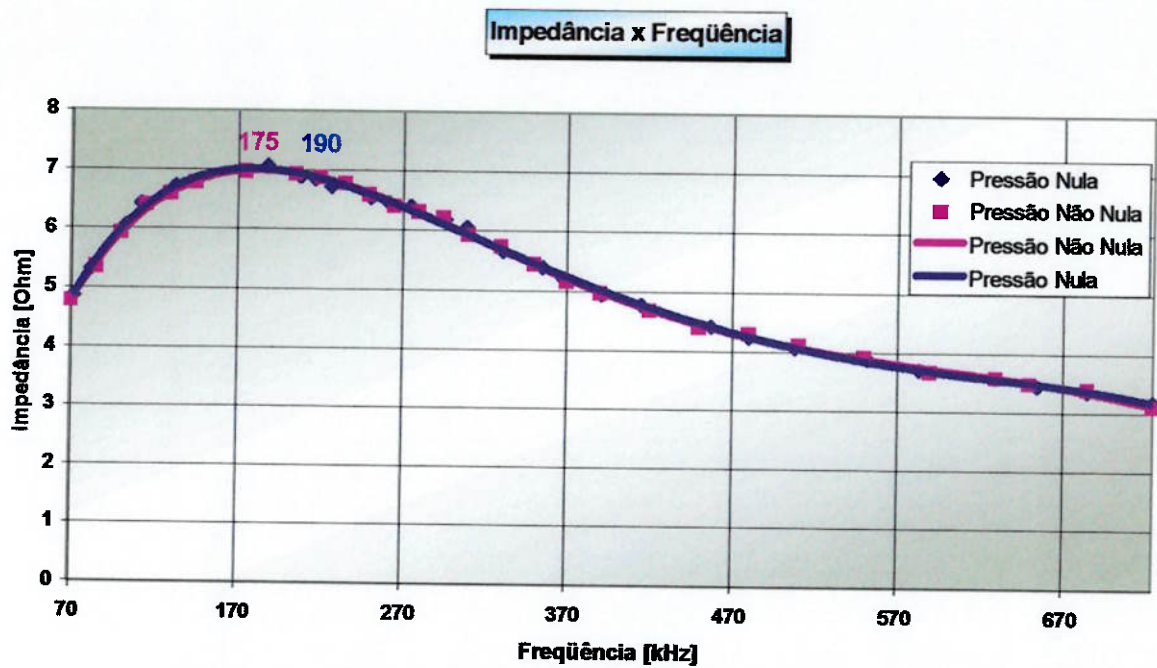
Vamos verificar também a diferença do valor da frequência mínima em relação ao valor da frequência de ressonância. Da equação (8) chegamos que:

$$F_{\text{MIN}} = 208,6 \text{ kHz}$$

Ainda podemos avaliar a viabilidade do medidor de pressão qualitativamente.

Sabemos que se aumentarmos a pressão aplicada a deflexão irá aumentar, e aumentando a deflexão a capacitância irá aumentar, pois as placas estarão mais próximas umas às outras (confirmando a equação (5)). O aumento da capacitância diminui a frequência de ressonância segundo a equação (6). Portanto se pegarmos o gráfico da impedância pela frequência veremos que o aumento da pressão irá deslocar o gráfico para a esquerda.

Assim, vamos observar a diferença entre os dois gráficos.



Podemos perceber que o aumento da pressão diminui a frequência de ressonância, como o esperado. Deste modo, a viabilidade física do medidor de pressão está comprovada.

6. Comentários Finais

Infelizmente não foi possível mensurar a pressão devido à indisponibilidade de equipamentos compatíveis com o medidor. Então, tais parâmetros como a sensibilidade, resolução e erro não puderam ser avaliados.

É de se ressaltar que os testes não foram feitos em tecidos humanos, então não foi possível investigar problemas como infecção devido ao funcionamento do medidor ou de não compatibilidade na medição de pressão de certos tecidos, por exemplo, não conseguir medir um vaso devido à dificuldade de fixar o medidor.

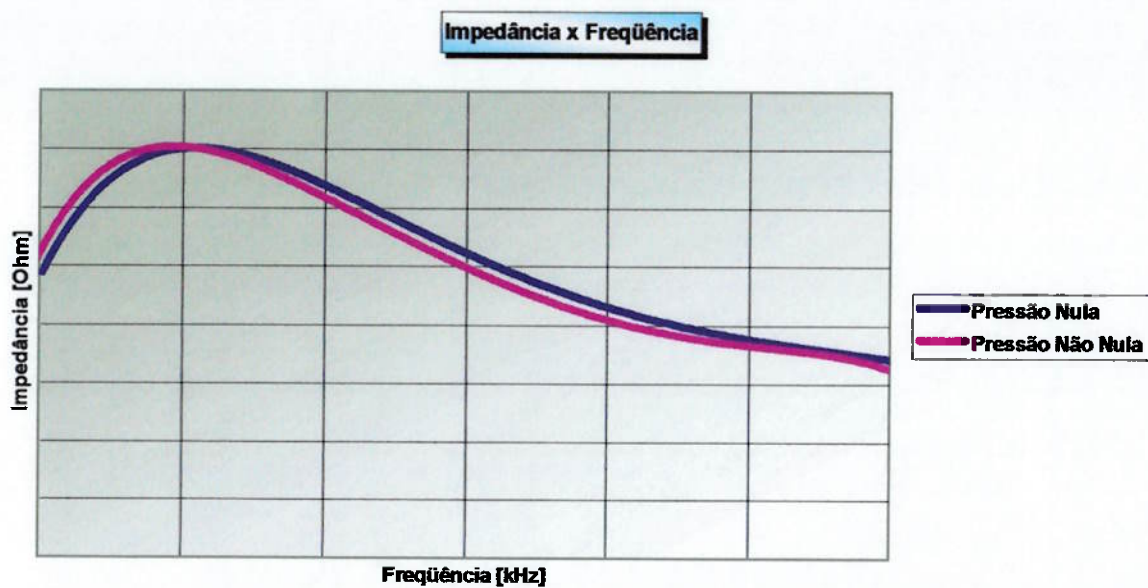
Podemos elencar alguns fatores que devem influenciar o desempenho deste tipo de sensor.

- ❑ A intensa utilização do capacitor pode levar o material à fadiga, ou até mesmo à ruptura do material caso haja qualquer fissura;
- ❑ A distância entre as bobinas pode afetar o sinal, tornando-o mais fraco ou até mesmo facilitando a entrada de campos externos;
- ❑ Todo capacitor tem uma medida máxima de pressão, se ultrapassada o material irá deformar plasticamente alterando o resultado final.

O medidor de pressão final tem uma escala reduzida, então é extremamente importante ter um bom processo de fabricação.

Entretanto a viabilidade física do medidor de pressão foi demonstrada, para um circuito RLC passivo de escala não reduzida. Ou seja, tanto o capacitor quanto as bobinas se comportaram como o esperado.

A seguir o gráfico qualitativo do medidor de pressão em relação ao aumento de pressão, levando o gráfico da impedância pela frequência para a esquerda, diminuindo a frequência de ressonância.



Isso indica que é possível construir um medidor de pressão a partir de um circuito RLC. O que irá delimitar a faixa mensurável de pressão será o capacitor. E o mais importante, a fonte de energia alternada deverá alcançar a frequência de ressonância do sistema que é em função da pressão aplicada.

7. Referências Bibliográficas

Timoshenko & Gere. **Mecânica dos Sólidos**. Vols. 1 e 2. 1994. Editora LTC.

Callister Jr., William. **Materials Science and Engineering – An Introduction**. John Wiley & Sons, Inc. Fourth Edition, 1997.

Serway, Raymond. **Física 3 para cientistas e Engenheiros**. 3ª. Edição. Editora LTC. 1996.

Ogata, Katsuhiko. **System Dynamics**. Third Edition. Prentice Hall. 1998.

Nicolela, MT. **Fluxo sanguíneo ocular em glaucoma: métodos de avaliação e importância**. Arq. Bras. Oftalm. 1997;60-6:639-49.

Schmidt, Walfredo. **Materiais elétricos – Condutores e Semicondutores**. Vol.1. Ed. Edgard Blücher Ltda. 1979.

Schmidt, Walfredo. **Materiais elétricos – Isolantes e Magnéticos**. Vol.2. Ed. Edgard Blücher Ltda. 1979.

Edminister A., Joseph. **Schaum's Outline of Theory and Problems of Electric Circuits**. McGraw-Hill. 1965.

Boffi. V., Luiz. Sobral Jr, Manoel. Dangelo C., José. **Conversão Eletromecânica de Energia**. Editora da Universidade de São Paulo. 1978.

Notas de Aula de PME2300 – **Mecânica dos Sólidos 1**. 2002.

Notas de Aula de PME2451 – **Medição de Grandezas Mecânicas**. 2002.

Notas de Aula de PME2380 – **Propriedades e Seleção de Materiais para Engenharia Mecânica**.

Apostila de PEA2288 – Eletricidade Geral. **Eletromagnetismo**. Epusp 1992.