

3. Princípios de medição usados pelos transmissores a serem utilizados

Neste capítulo apresentam-se os dois princípios mais utilizados nos transmissores, para medição de pressão na área industrial e que conduzem a maior exatidão.

3.1. O Capacitor

Um capacitor ou condensador é um componente que armazena energia num campo elétrico, acumulando um desequilíbrio interno de carga elétrica [12].

3.1.1. Descrição Geral

Os formatos típicos consistem em dois eletrodos ou placas que armazenam cargas opostas. Estas duas placas são condutoras e são separadas por um isolante ou dielétrico. A carga é armazenada na superfície das placas, no limite com o dielétrico. Devido ao fato de cada placa armazenar cargas iguais, porém opostas, a carga total no dispositivo é sempre zero.

3.1.2. Capacitância

A propriedade que estes dispositivos possuem de armazenar energia elétrica sob a forma de um campo eletrostático é chamada de capacitância (C) e é medida pelo quociente da quantidade de carga (Q), armazenada pela diferença de potencial (V), que existe entre as placas .

$$C = \frac{Q}{V} \quad (22)$$

Pelo Sistema Internacional (SI), um capacitor tem a capacitância de um Farad (F) quando um coulomb de carga causa uma diferença de potencial de um volt (V) entre as placas. O Farad é uma unidade de medida considerada muito grande para os circuitos práticos, por isso, são utilizados valores de capacitância expressos em microfarads (μF), nanofarads (nF) ou picofarads (pF).

A equação acima é exata somente para valores de Q muito maiores que a carga do elétron ($e = 1.602 \times 10^{-19} \text{ C}$).

Por exemplo, se uma capacitância de 1pF fosse carregada a uma tensão de 1 μV , a equação perderia uma carga $Q = 10^{-19} \text{ C}$, mas isto seria impossível já que seria menor do que a carga de um elétron.

A capacitância de um capacitor de placas paralelas [12], constituído de dois eletrodos planos idênticos de área A , separados à distância constante d , Fig. 7, é aproximadamente igual a:

$$C = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{A}{d} \quad (23)$$

onde, C = Capacitância em farads

ϵ_0 = Permissividade eletrostática do vácuo.

ϵ_r = Constante dielétrica ou permissividade relativa do isolante utilizado.

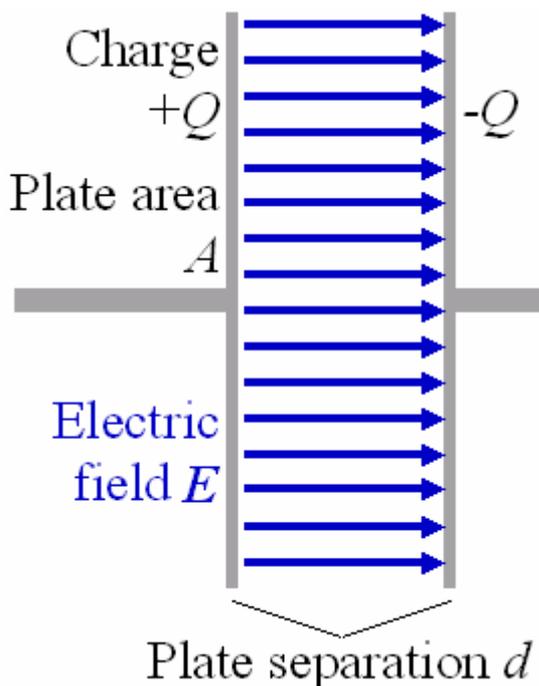


Figura 7: O capacitor de placas planas paralelas

Quando uma diferença de potencial $V = Ed$ é aplicada às placas deste capacitor simples, surge um campo elétrico entre elas. Este campo elétrico é produzido pela acumulação de cargas na placa.

3.1.3. Energia

A energia (no SI, medida em Joules) armazenada em um capacitor é igual ao trabalho feito para carregá-lo.

Considere-se um capacitor com capacitância C , com uma carga $+q$ em uma placa e $-q$ na outra. Movendo um pequeno elemento de carga dq de uma placa para a outra contra a diferença de potencial $V = q/C$ necessita de um trabalho dW :

$$dW = \frac{q}{C}dq \quad (24)$$

Pode-se determinar a energia armazenada em um capacitor integrando esta equação. Começando com um capacitor descarregado ($q = 0$) e movendo a carga de uma placa para outra até que as placas tenham carga $+Q$ e $-Q$, será desenvolvido um trabalho dW :

$$W_{\text{carregando}} = \int_0^Q \frac{q}{C}dq = \frac{1}{2} \frac{Q^2}{C} = \frac{1}{2} CV^2 = E_{\text{armazenada}} \quad (25)$$

3.1.4. Circuitos Elétricos

Os elétrons não podem passar diretamente através do dielétrico, de uma placa do capacitor para a outra. Quando uma voltagem é aplicada a um capacitor, a corrente flui para uma das placas carregando-a, enquanto flui da outra placa, carregando-a inversamente. Em outras palavras, quando a tensão aplicada em um capacitor muda, o capacitor será carregado ou descarregado.

A expressão da corrente é dada por :

$$I = \frac{dQ}{dt} = C \frac{dV}{dt} \quad (26)$$

Onde I é a corrente fluindo na direção na direção convencional, e dV/dt é a derivada da tensão.

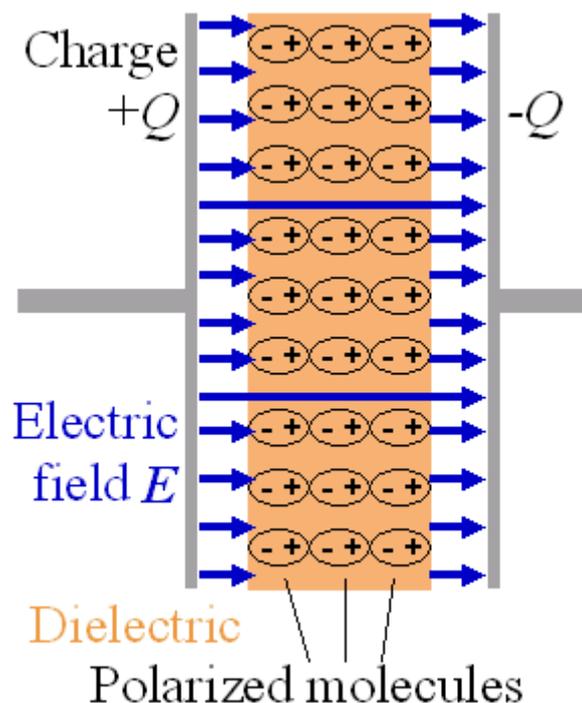


Figura 8: Polarização em um capacitor energizado

Os elétrons das moléculas mudam em direção à placa da esquerda positivamente carregada. As moléculas criam então um campo elétrico do lado esquerdo que anula parcialmente o campo criado pelas placas.

No caso de uma tensão contínua (CC), um equilíbrio é encontrado, quando a carga das placas correspondem a tensão aplicada $Q = CV$, e nenhuma corrente poderá mais fluir pelo circuito. Entretanto correntes alternadas (CA) podem, a cada mudança de tensão, ocasionar carga ou descarga do capacitor, permitindo desta forma que a corrente flua. A resistência de um capacitor à passagem da corrente, sob regime AC, é conhecido como reatância capacitiva e a mesma varia conforme a frequência do sinal AC. A reatância capacitiva é dada por:

$$X_C = \frac{1}{2\pi fC} \quad (27)$$

onde, X_C = reatância capacitiva medida em ohms.

f = frequência do sinal AC medida em Hertz (Hz)

C = capacitância medida em Farads (F).

Desta forma a reatância é proporcionalmente inversa à frequência do sinal.

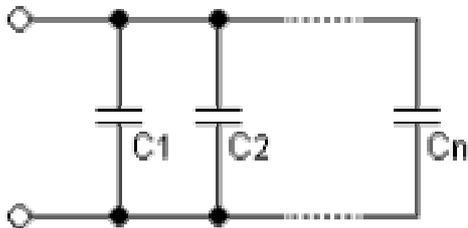
Como sinais CC possuem frequência igual a zero, a fórmula confirma que capacitores bloqueiam completamente a corrente, após um determinado tempo, em que o capacitor está carregado. Para correntes alternadas (CA), com frequência muito alta, a reatância por ser muito pequena, pode ser desprezada em análises aproximadas do circuito. A impedância de um capacitor é dada por :

$$Z = \frac{-j}{2\pi fC} \quad (28)$$

onde, $j = \sqrt{-1}$

3.1.5. Associação de Capacitores

Em um circuito de capacitores montados em paralelo , conforme mostrado na Fig. 9, todos estão sujeitos a mesma diferença de potencial. Para se calcular a sua capacidade total (C_{eq}) :



$$C_{eq} = C_1 + C_2 + \dots + C_n$$

Figura 9: Associação de capacitores em paralelo

A corrente que flui através de capacitores em série (Fig. 10) é a mesma, porém cada capacitor terá uma queda de tensão (diferença de tensão entre seus terminais) diferente. A soma das diferenças de tensão é igual à diferença de tensão (ou potencial) total. Para se obter a capacitância total tem-se :



$$\frac{1}{C_{eq}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_n}$$

Figura 10: Associação de capacitores em série

Na associação mista de capacitores, tem-se capacitores associados em série e em paralelo. Neste caso, o capacitor equivalente deve ser obtido, resolvendo-se o circuito em partes, conforme sua configuração. Por isso, calcula-se antes a associação de capacitores em série para após efetuar o cálculo dos capacitores em paralelo.

3.1.6. Aplicações

Capacitores são comumente usados em fontes de energia, onde eles suavizam a saída de uma onda retificadora completa ou meia onda.

Por causa de os capacitores passarem sinais de corrente alternada, mas bloquearem corrente contínua, eles são freqüentemente usados para separar componentes AC e DC de um sinal. Este método é conhecido como acoplamento AC.

3.2 Sensores por Silício Ressonante

Aproximadamente 70 anos atrás, a tecnologia de relógio a quartzo foi descoberta nos laboratórios Bell, nos Estados Unidos. O coração do relógio é o cristal ressonante, um elemento que, graças às propriedades elásticas do quartzo, vibra a freqüência constante. Devido a sua exatidão e estabilidade, relógios a quartzo foram rapidamente aplicados em funções de engenharia, tais como astronomia e medidas padrão de medição de tempo internacionais. Décadas após, o cristal ressonante começou a ser utilizado em medidas de pressão. Diferentemente dos relógios, onde o cristal ressonante sente a pressão atmosférica, um lado do cristal em um transdutor de pressão está em contato com o fluido a ser medido. Quando a pressão aumenta, o cristal é solicitado, alterando a freqüência de oscilação.

3.2.1. Conceitos Básicos

Segundo Anderson [13], o sensor consiste de uma cápsula de silício colocada estrategicamente em um diafragma, utilizando-se do diferencial de pressão para vibrar em maior ou menor intensidade, afim de que essa frequência seja proporcional a pressão aplicada. A Fig. 11 mostra a forma dos 02 cristais de silício ressonante em forma de H, assim como a posição física dos mesmos no diafragma de silício.

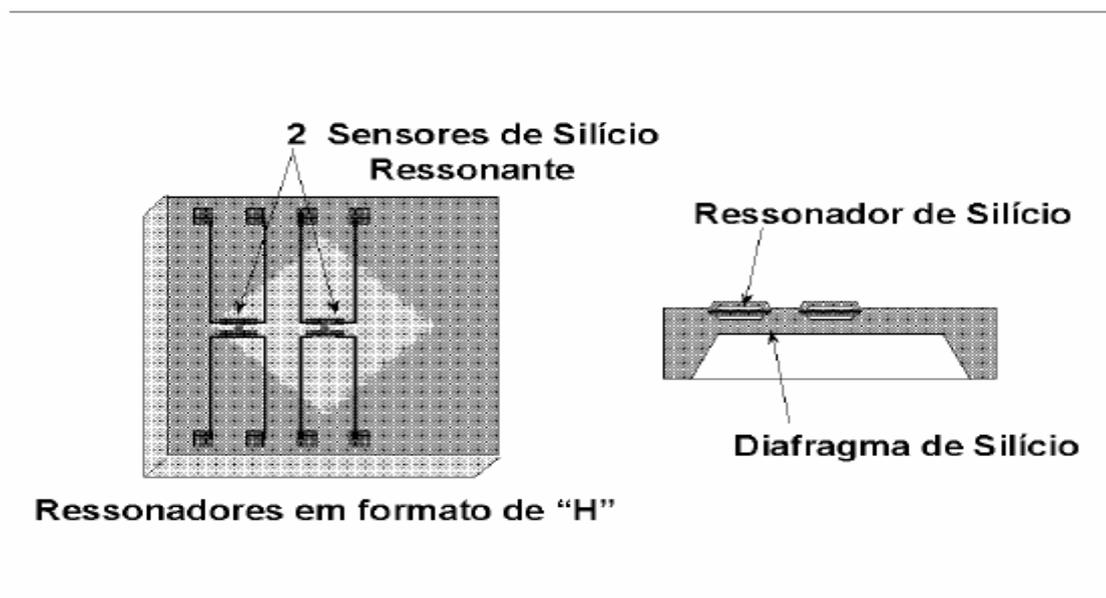


Figura 11: Disposição física dos sensores de Silício Ressonante

Para uma melhor compreensão de funcionamento deste transmissor de pressão, faz-se necessário desmembrá-lo em algumas partes vitais. Na Fig. 12, pode-se ver o conjunto do sensor. Ele possui um ímã permanente e o sensor de silício propriamente dito.

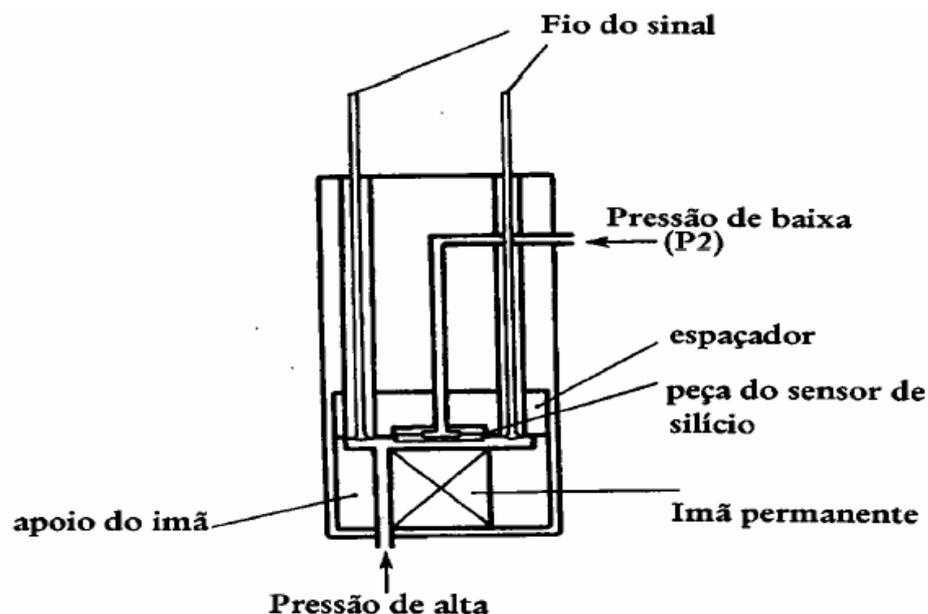


Figura 12: Conjunto do Sensor de silício propriamente dito

Dois fatores que irão influenciar na ressonância do sensor de silício são: o campo gerado por um ímã permanente posicionado sobre o sensor e o campo elétrico gerado por uma corrente AC (além das pressões exercidas sobre o sensor). A Fig. 13 abaixo, mostra o esquemático do sensor de silício, indicando o diafragma com os dois sensores, um submetido a tração e o outro a compressão, o ímã permanente e as pressões do sistema a ser medido.

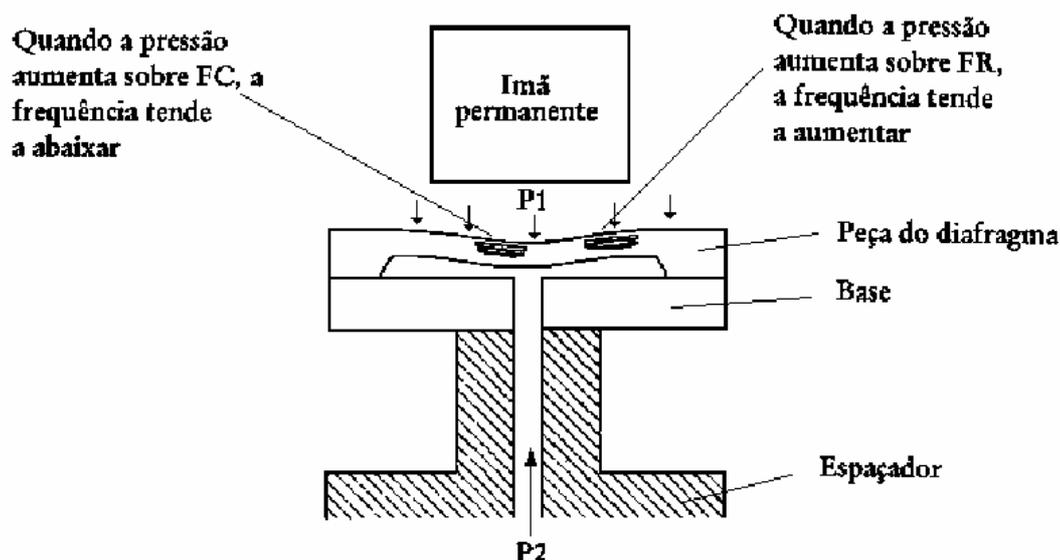


Figura 13: Esquemático do conjunto sensor

Portanto, a combinação do fator campo magnético/campo elétrico é

responsável pela vibração do sensor.

Um dos sensores ficará localizado ao centro do diafragma (FC), enquanto que o outro terá sua disposição física mais a borda do diafragma (FR). Por estarem localizados em locais diferentes, porém, no mesmo encapsulamento, um sofrerá uma compressão e o outro uma tração, conforme a aplicação de pressão sentida pelo diafragma.

Desta maneira, os sensores possuirão uma diferença de frequência entre si. Esta diferença pode ser detectada por um circuito eletrônico, tal diferença de frequência será proporcional ao ΔP aplicado. Na Fig. 14 é exibido o circuito eletrônico equivalente.

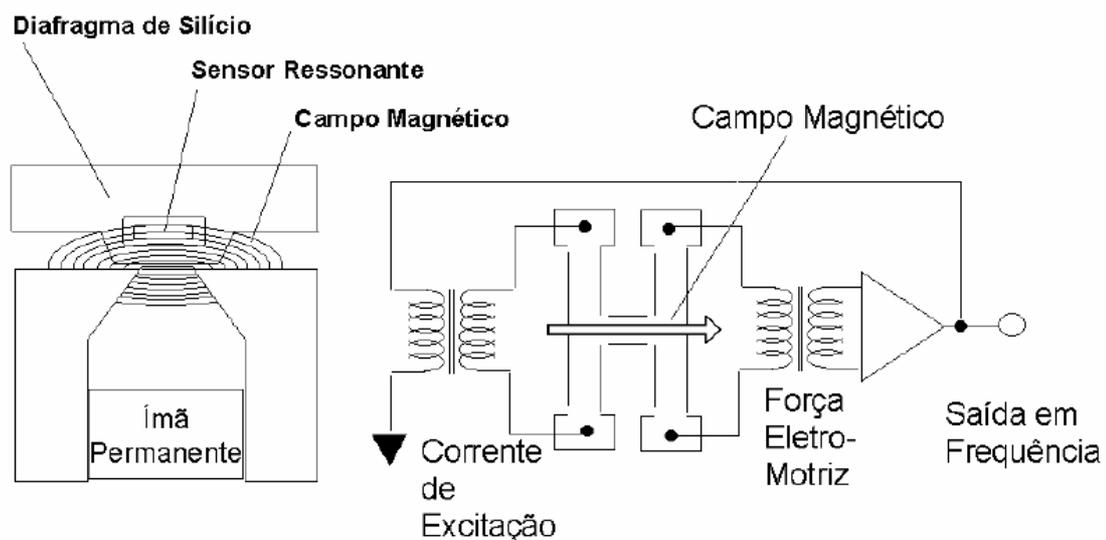


Figura 14: Circuito eletrônico equivalente

Através destas informações, é possível criar um gráfico (Fig. 15) referente aos pontos de operação da frequência X pressão.

Variação da Frequência com a Pressão

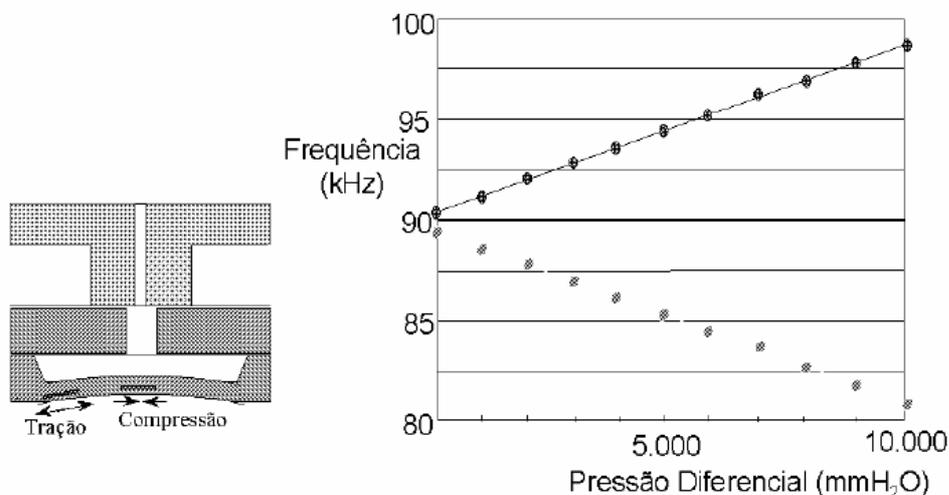


Figura 15: Gráfico mostrando as frequências de saída X pressão

3.2.2. Considerações de projeto

3.2.2.1. A Idéia Básica

Hoje em dia, muitos sensores magnéticos são disponíveis (Integrated Resonant Magnetic Field Sensor [15]), a maioria deles baseados no efeito Hall. Infelizmente, sua sensibilidade e resolução são relativamente ruins para aplicações especiais, tais como, sistemas de determinação da posição ou medidas de desvio do campo magnético da terra. Outros grandes problemas são a não linearidade, desvios da calibração e a pequena faixa de medição. O uso de estruturas de silício ressonante é uma maneira bem conhecida de criar transdutores de elevada sensibilidade e exatidão. O objetivo é projetar e construir sensores de campo magnético baseados no conceito ressonante, obtendo alta sensibilidade, baixa resolução, pequenos desvios e elevada faixa dinâmica.

O ressonador que foi criado, é uma fina e flexível camada de cristal de silício, o qual é presa a estrutura suporte por duas barras torcionais. Se uma

corrente senoidal passa através da bobina e um campo magnético externo está presente, a placa vibrará em decorrência de forças de Lorentz geradas em cada segmento de bobina perpendicular a direção do campo (Fig. 16).

Se a frequência da corrente de excitação é igual à frequência de oscilação natural da placa, a amplitude da oscilação crescerá em larga escala, devido a ressonância e alto fator de qualidade. A amplitude vibracional, a qual é proporcional ao campo magnético externo aplicado é convertido no domínio elétrico usando capacitores. A capa de vidro, carregando eletrodos em suspensão é fixada sobre a superfície do chip de silício, conforme indicado na Fig. 16. Os eletrodos formam capacitores sensíveis com os eletrodos localizados na placa de silício. A capa de vidro contém quatro eletrodos capacitores. Os capacitores externos são usados como equipamentos sensores, enquanto que os capacitores internos são usados para objetivo de realimentação. A vibração da placa, implicará em mudanças assimétricas nos capacitores de detecção, os quais são percebidos por amplificadores operacionais adequados. A saída do sistema é um sinal em amplitude modulada, o qual é amplificado e demodulado usando detectores síncronos. O resultado deste processo é um sinal de baixa frequência, cuja amplitude é proporcional a grandeza do campo magnético externo. O mesmo sinal pode ser usado com a finalidade de realimentação. Uma vez que, a força eletrostática gerada em um capacitor é sempre atrativa

Uma vez que, a força eletrostática gerada em um capacitor é sempre atrativa, necessita-se de realimentação negativa eletrônica, o qual chaveia os sinais de realimentação alternadamente aos capacitores de realimentação. Isto significa que, somente um capacitor está ativo durante metade do período vibracional; logo o conjugado da força de Lorentz pode ser compensado desta maneira. A amplitude do sinal demodulado é a medida do campo magnético. Este tipo de controle em loop habilita ao sensor um grande faixa dinâmica, devido a relação quadrática força (ou torque) e a tensão de realimentação. Este sistema é mostrado na Fig. 17.

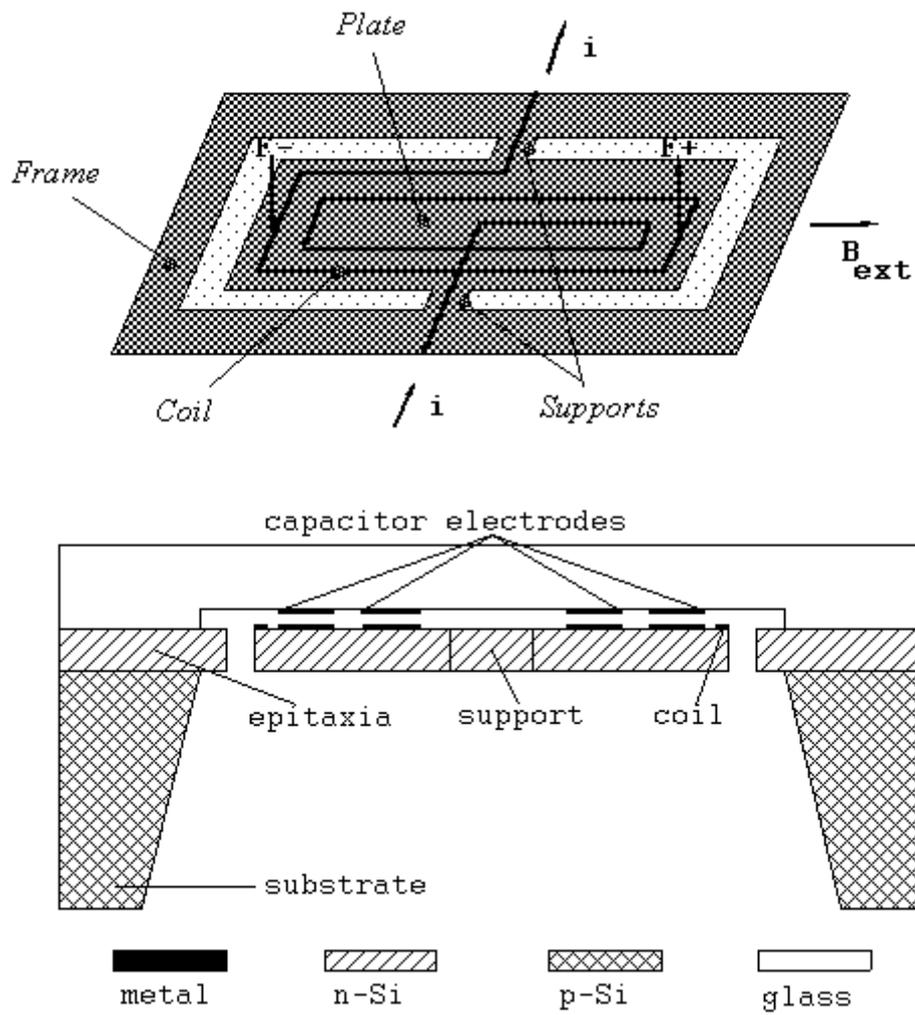


Figura 16: Estrutura básica e seção em corte do ressonador

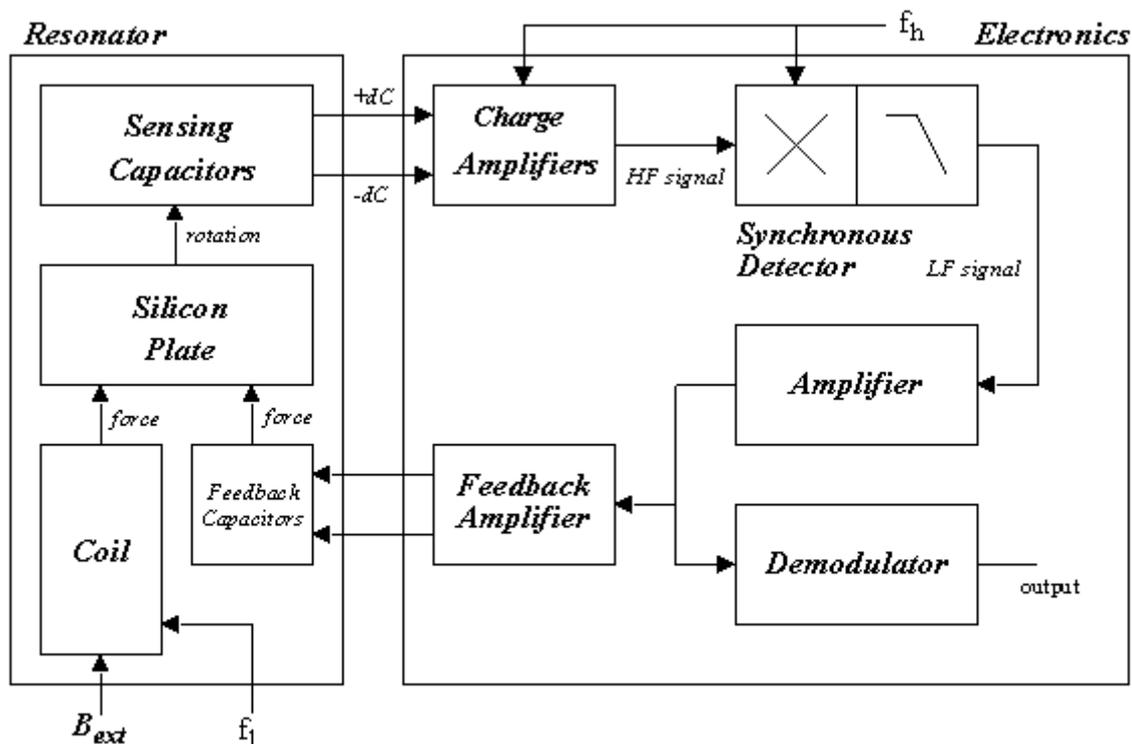


Figura 17: Esquemático em Blocos do Sensor

3.2.2.2. Porque o Uso de Silício

Para a fabricação do ressonador é utilizado camada de silício, com tecnologia padrão de circuito integrado. Desde que, circuitos eletrônicos podem ser criados por meio desta tecnologia, se torna muito fácil integrar o ressonador e o circuito no mesmo chip. Esta configuração é chamada na literatura como, sensor inteligente. Combinando o elemento sensor com a unidade de processamento pode-se obter as seguintes vantagens:

- 1) O processo de criação do silício é muito desenvolvido e permite a fabricação de equipamentos idênticos, a relativo baixo custo, se houver produção em massa.
- 2) A interconexão entre o elemento sensor e o circuito eletrônico pode ser muito pequena, provendo boa imunidade à sinais espúrios.
- 3) Durante todo o tempo, o sensor inteligente requer somente dois condutores

de conexão ao microprocessador.

- 4) Se o sinal proveniente do elemento sensor é amplificado diretamente na fonte, a sensibilidade do sensor pode sofrer grande aumento.
- 5) Adicionando-se unidades de processamento de sinal, pode-se auxiliar a padronização da saída do sensor
- 6) Características de frequência, desvio do zero, não linearidade e range de medida podem ser ajustados por intermédio do chip eletrônico.
- 7) Sensores inteligentes podem ser bem pequenos, logo eles podem substituir sensores comuns, em aplicações onde o tamanho é de grande importância.

Entretanto, o conceito de sensor inteligente possui também as seguintes desvantagens:

- 1) O desenvolvimento do sensor inteligente suplanta em muito o custo do sensor padrão e este somente é aceitável onde, um grande número de sensores idênticos podem ser produzidos e vendidos.
- 2) A combinação do elemento sensor e o circuito de processamento pode reduzir o rendimento.
- 3) O pequeno espaço ocupado pelo elemento sensor e circuito eletrônico, pode ocasionar um acoplamento não previsto, como realimentação de calor.
- 4) O elemento sensor deve ser muito sensível ao mensurando, e o circuito eletrônico não deve ser influenciado por ele. Na prática isto não é muito fácil de se obter.
- 5) Somente passos padrão de processamento de circuito integrados são permitidos para fabricação do elemento sensor. Isto reduz as possíveis variações do projetista.
- 6) O circuito eletrônico é exposto ao mensurando. Em alguns casos (sensores

químicos), isto dificulta o empacotamento do sensor.

Outras importantes características do cristal de silício são que, eles possuem excelentes características elétricas e excelentes propriedades mecânicas. Embora ele seja um frágil material, certamente ele não é tão frágil como normalmente acreditado. O módulo de elasticidade (E) aproxima-se do aço inox, níquel e se situa bem acima do quartzo. O silício possui uma resistência a tração, a qual é pelo menos três vezes maior que o fio de aço inox.

3.2.3. Porque o uso do ressonador torcional

O mais simples estrutura de ressonância é a barra (presa em um ou nos dois lados), a vibração no seu modo fundamental de flexão é mostrado na Fig. 18.

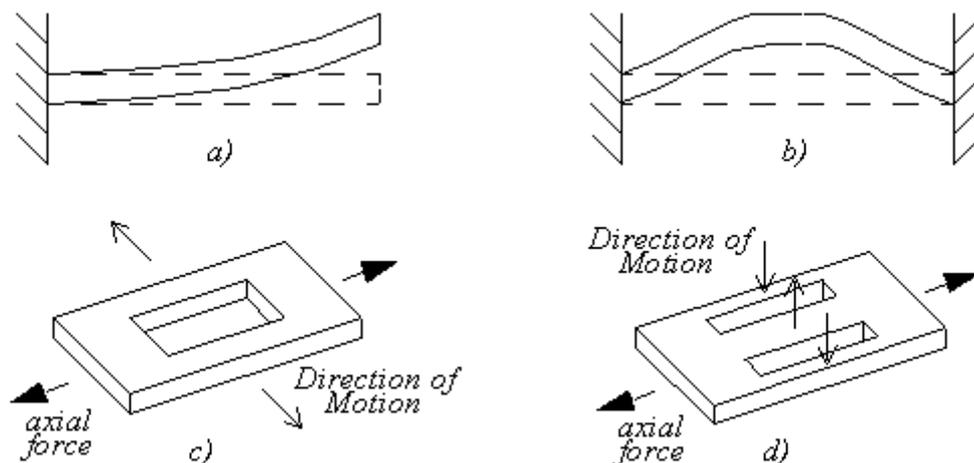


Figura 18: Tipos de vibração de uma barra

Sendo necessária alta qualidade mecânica, a peça ressonante deve ser colocada no vácuo. Neste caso, o fator de qualidade é determinado por dois principais efeitos. O primeiro é a radiação de energia aos suportes na estrutura de sustentação. A perda de energia (a qual é relativamente grande no caso da barra simples) pode ser minimizada pela isolamento mecânica do ressonador a sua base. Em outras palavras, as forças e torques atuando nos suportes deverão ser

A outra principal perda de energia é causada por mecanismos internos de amortecimento. Primeiramente, eles são dependentes do material usado para o ressonador e são influenciados pelos deslocamentos, defeitos pontuais ou impurezas. Outros componentes são as *akheiser* e as perdas termo elásticas. Felizmente, o cristal de silício possui um baixo deslocamento e taxa de impureza, assim estes defeitos não são significativos. Amortecimento *akheiser* ocorre porque o modelo de onda elástica estável em ressonância, ocasiona um distúrbio na distribuição do equilíbrio das ondas elásticas termicamente excitadas. O atrito interno termo elástico é causado pela condução térmica irreversível das regiões de compressão as regiões de expansão, as quais ocorrem durante as vibrações de flexão e longitudinais. Pode ser facilmente observado através da comparação dos mecanismos de perda de energia que, ressonadores torcionais de massa balanceada possuem inerentemente grande qualidade mecânica do que outros, os quais prometem um dispositivo de maior sensibilidade. Estas foram as razões pelas quais, foi decidido usar um ressonador torcional, como elemento sensor do transdutor de campo magnético ressonante. A estrutura selecionada (similar à mostrada na Fig.19) é muito utilizada para a excitação aplicada e técnica de detecção e será discutida nas próximas seções.

3.2.4. Porque somente bobina de uma volta?

Para a excitação do silício ressonante, uma bobina de uma espira depositada na superfície do silício foi usada. Durante o projeto da bobina, o principal objetivo é foi achar uma ótima configuração, a qual gera o máximo torque obtendo a máxima sensibilidade. O torque (M) pode ser calculado por:

$$M = 2.B.I.\sum_{i=1}^n x_i.l_i \quad (29)$$

Onde B é o campo magnético externo, I é a corrente, n é o número de voltas, l_i é o comprimento do segmento de bobina volta i, perpendicular a direção do campo e x_i é a distância deste segmento de fio medido a partir do centro da placa. O número de voltas depende da largura do fio (d), o espaço entre os fios (g) e das dimensões da placa (w, L). Durante o projeto, deverá se r levado em conta a dissipação de potência da bobina, a qual não pode exceder poucos MW, devido ao aumento indesejável da temperatura da estrutura.

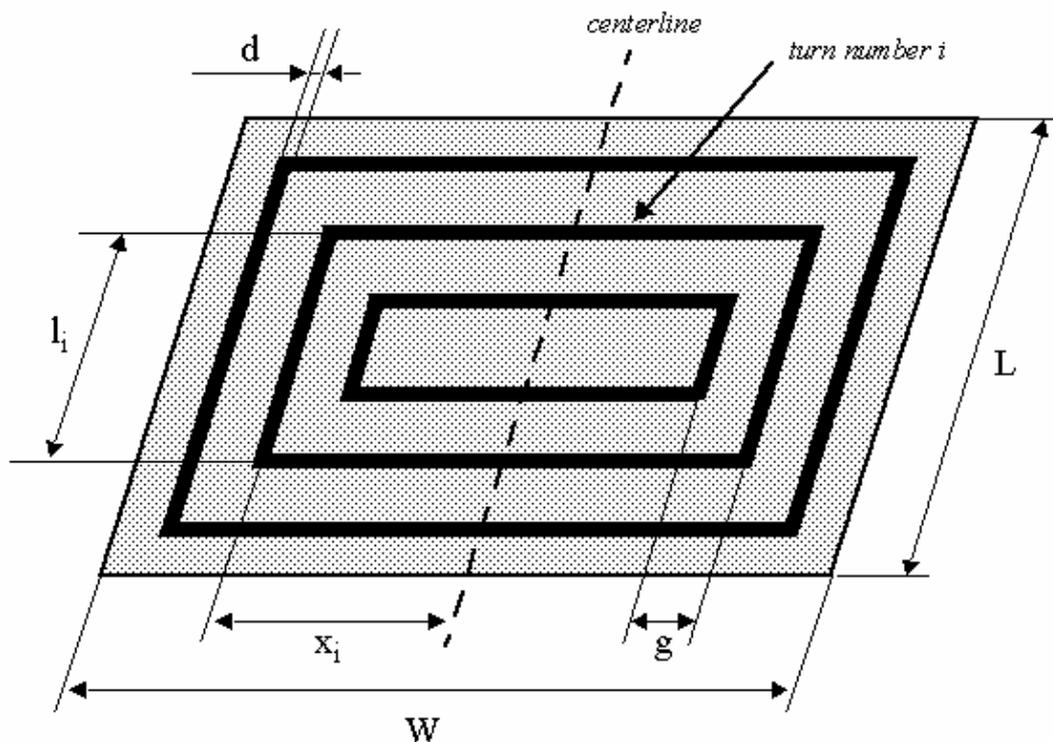


Figura 20: Dimensões da Bobina

Devido ao grande número de variáveis, um programa de computador foi desenvolvido para calcular os torques e as correspondentes configurações para uma dada área, sob as restrições anteriormente previstas. O primeiro problema foi obter a ótima razão W/L . Portanto, alguns parâmetros ($B, W * L$ (área)) são mantidos constantes, a relação W/L é variada de 1 a 4 e o computador rodou buscando uma ótima configuração, variando os parâmetros d, g e I entre pré-determinados limites. A Tab. 1 mostra os limites e os resultados dos cálculos.

Na Fig. 21 é colocado em gráfico o torque normalizado em função da razão W/L . Pode ser observado que, o maior torque pode ser obtido quando $W=L$, mas a faixa quase ótima (mais do que 90%) é considerada quando $1 < W/L < 2$. Não é recomendado usar razões elevadas em decorrência do razoável decréscimo do torque.

Tabela 1 Configurações ótimas para uma dada área ($10^6 \mu\text{m}^2$)

W[μm]	L[μm]	d[μm]	g[μm]	n	I[mA]	P[mW]	M[10^{-6} N[μm]
1000	1000	50	6	8	9,3	1,97	32,4
1100	909	50	6	8	9,3	1,99	32,13
1200	833	49	6	7	9,3	1,99	31,64
1300	769	50	6	6	9,7	2	31,16
1400	714	48	6	6	9,3	2	29,89
1500	667	50	6	5	9,9	1,98	29,22
1600	625	47	6	5	9,4	1,99	28
1700	588	49	6	5	9,5	1,9968	27,012
1800	555	47	6	5	9,1	1,9960	25,806
1900	526	44	6	5	8,6	1,9979	24,691
2000	500	41	6	5	8,1	1,9940	23,612

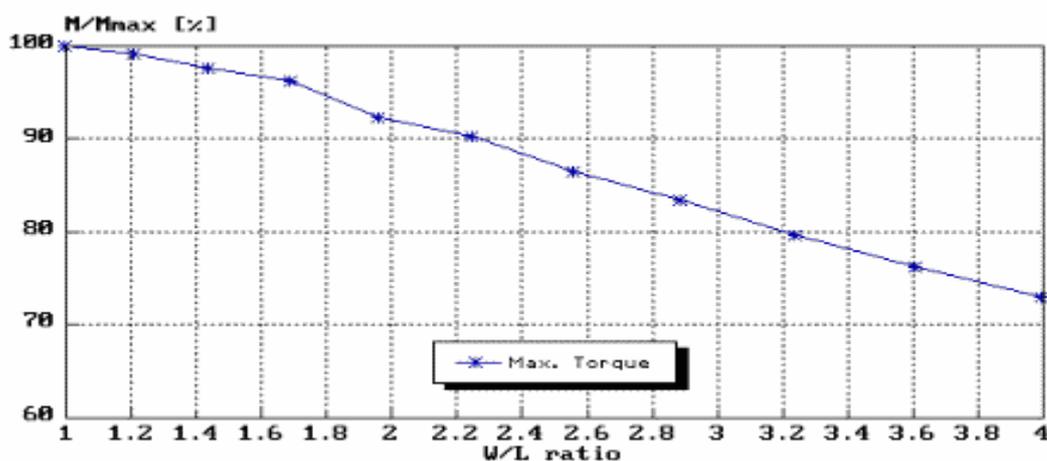


Figura 21: Ótimo Torque em função da razão W/L

O segundo problema foi a determinação do par n, I o qual fornece o máximo torque, uma vez que W e L já foram definidos. A Fig. 22 mostra o resultado dos

cálculos. O melhor projeto pode ser obtido se forem usados números moderados de espiras (n de 9 a 15) e amplitudes de correntes (de 4 a 6 mA). Infelizmente, um sério problema pode ocorrer em decorrência da diferença dos coeficientes de expansão térmica, da placa de silício e fios de alumínio. Este fenômeno pode ocasionar flexões para cima ou para baixo, com mudanças de temperatura, se uma grande quantidade de alumínio for utilizada.

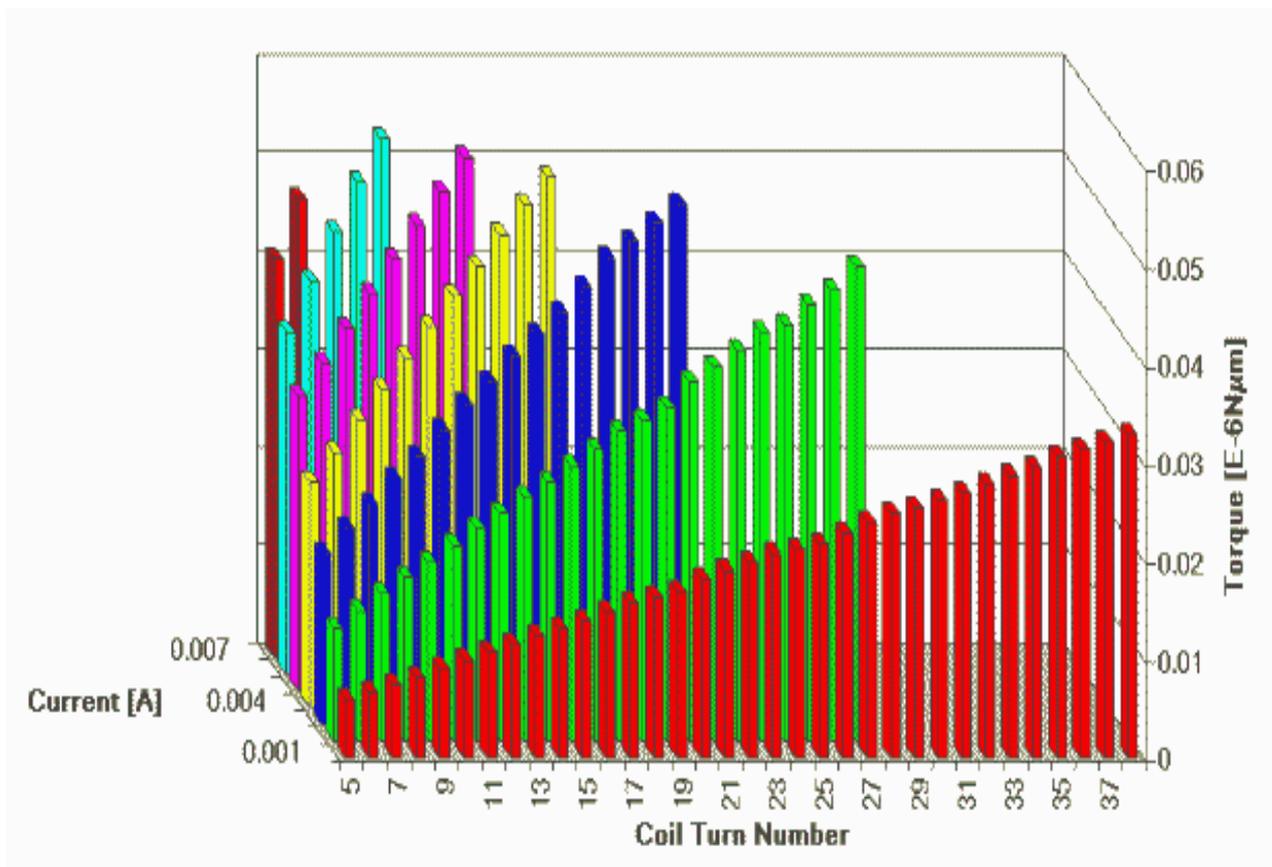


Figura 22: Cálculos Computacionais das Configurações das Bobinas e Torques ($W = 1428 \mu\text{m}$, $L = 714 \mu\text{m}$, $B = \mu\text{T}$, $P_{\text{Max}} = 2 \text{ mW}$, $J_{\text{max}} = 1 \text{ mA}/\mu\text{m}^2$)

Felizmente, o torque já é elevado se for usado um pequeno número de espiras e uma corrente elevada. O projeto final possui somente espira com largura de $50 \mu\text{m}$ e espessura de $0,6 \mu\text{m}$ e corrente de excitação de amplitude máxima de 30 mA . Desta maneira é possível minimizar os efeitos de flexão, perdendo somente de 20 a 25% em respeito ao torque (sensitividade) ótimo teórico calculado.

3.2.5. Porque detecção Capacitiva e Realimentação

A estrutura mecânica do ressonador deve ser levada a vibrar e esta vibração tem de ser detectada. Neste caso, a excitação é realizada por um campo magnético externo. Para detectar esta vibração podemos escolher entre seis técnicas possíveis.

1) Detecção Capacitiva. Esta técnica requer 02 eletrodos dispostos bem próximos, onde um é colocado na estrutura de vibração, conforme pode ser observado na Fig. 23 a.

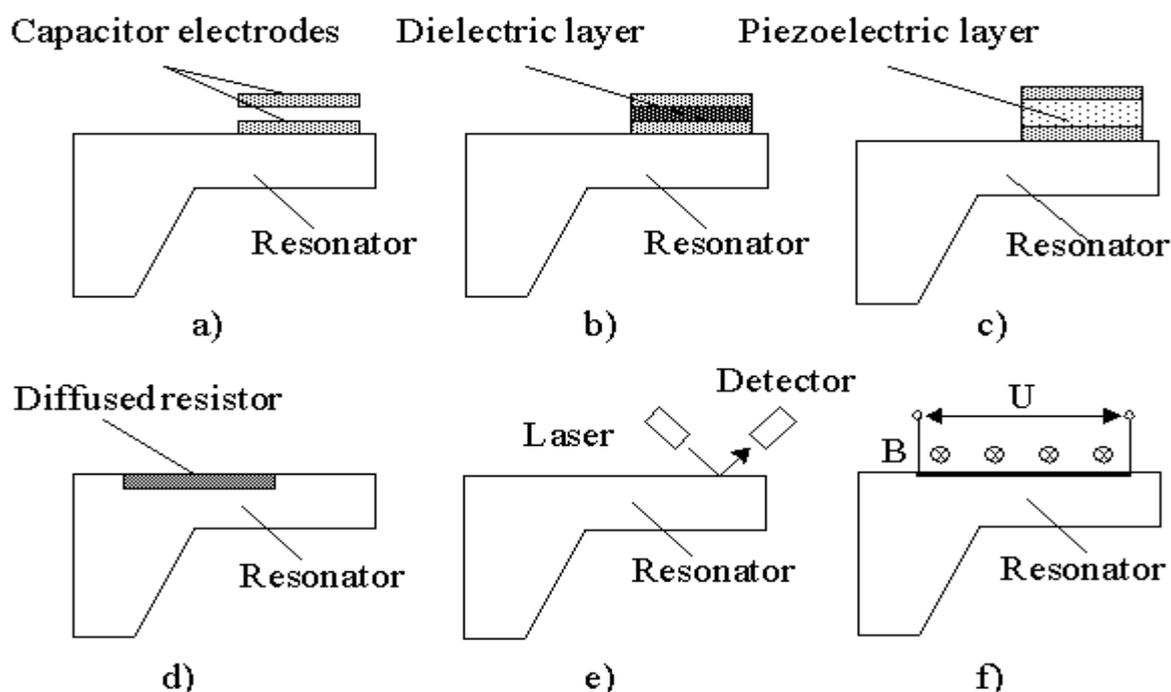


Figura 23: Diferentes técnicas de Detecção da Vibração a) capacitiva, b) dielétrica, c) piezo elétrica, d) piezo resistiva, e) ótica e f) magnética

Se o ressonador se movimenta a capacitância muda, o que é detectado eletronicamente. É um método muito interessante porque, provê uma saída linear quando a amplitude da vibração é pequena e não é sensível a mudanças de temperatura. Entretanto, a fina camada de ar situada entre os eletrodos, causa uma grande força de amortecimento no ressonador e reduz o fator de qualidade.

2) Detecção Dielétrica. Esta técnica usa uma estrutura em sanduíche, consistindo numa fina camada de dielétrico entre o eletrodo superior e o inferior no topo do elemento de vibração. O movimento da estrutura mudará a espessura da camada dielétrica e conseqüentemente a capacitância. Desde que, a permeabilidade do material dielétrico é usualmente dependente da temperatura, esta técnica não pode ser usada se o equipamento for utilizado em uma larga faixa de temperatura.

3) Detecção Piezo elétrica. Um material piezo elétrico, tal como quartzo cristalino, pode ser construído com cargas em dipolo. Quando este é exposto a solicitações mecânicas, as características elétricas mudam, as quais podem ser utilizadas para detecção de vibração. Infelizmente o silício não é piezo resistivo, logo uma camada de um outro material piezo resistivo, deve ser depositada no elemento de ressonância. Como usualmente utilizado, o ZnO possui boas características piezo elétricas, porém não é normalmente utilizado na tecnologia de Circuitos Integrados (IC).

4) Detecção Piezo Resistiva. Resistores me circuitos integrados podem ser usados para detecção de vibração, desde que sua resistividade muda devido a presença de stress no material. Uma vantagem desta tecnologia é a facilidade de fabricação de resistores, usando a tecnologia de circuitos integrados e o silício possui grandes coeficientes de piezo resistividade. O principal obstáculo deste método é a sua grande sensibilidade as alterações da temperatura.

5) Detecção Ótica. Existem 02 principais tipos de detecção ótica, a interferométrica e a amplitude modulada. O método de amplitude modulada é mais simples, porém possui menor sensibilidade. A maior vantagem desta técnica é que ela não influencia, nem degrada a vibração. Entretanto, esta montagem parece ser difícil de integrar em um de silício.

6) Detecção Magnética. A vibração de um condutor em um campo magnético, cria uma tensão induzida. Este fenômeno pode ser utilizado para detecção de vibração. Apesar da simplicidade desta técnica, ela é raramente utilizada. Provavelmente, isto pode ser explicado pela pequena tensão de saída se um campo magnético fraco está disponível.

Para a compensação da vibração (realimentação), podemos usar outro campo magnético gerado por uma outra bobina estrategicamente posicionada. Desde que, a relação entre a corrente de realimentação e o campo magnético gerado é linear, o range dinâmico resultante é moderado. Uma faixa dinâmica muito maior pode ser obtido usando uma malha de realimentação capacitiva. Introduzindo eletrodos capacitivos, sobre e acima do elemento ressonante pode-se gerar forças eletrostáticas agindo sobre a estrutura, aplicando uma tensão neste capacitor. Desde que, a relação entre a força eletrostática e a tensão é quadrática, uma elevada faixa dinâmica pode ser esperada deste tipo de malha de realimentação. A maior dificuldade deste tipo de malha de controle é que o mesmo não é linear.

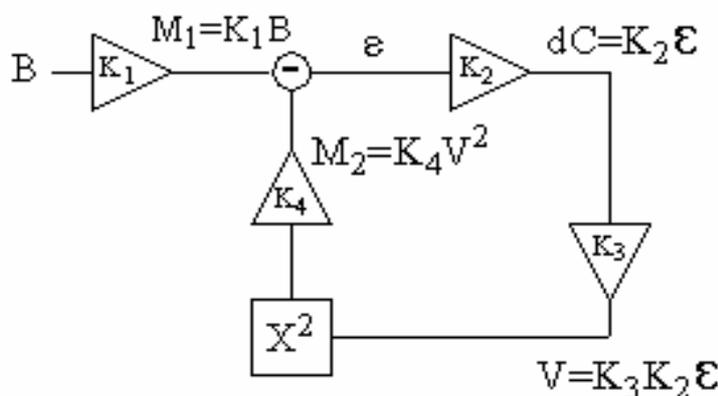


Figura 24: Diagrama em blocos da malha de realimentação capacitiva

Na Fig. 24 acima é mostrado o diagrama em bloco desta malha. O sinal de entrada do sensor, o campo magnético é transformado em torque M_1 pelo elemento ressonante. Este torque é compensado pelo sinal de realimentação M_2 .

O torque erro resultante (ε) imprime vibração no elemento ressonante, a qual é detectada pelo circuito eletrônico e transformada na tensão V . Esta tensão V é usada gerando o torque de realimentação M_2 . Podemos escrever uma equação entre a entrada, realimentação os sinais do torque erro.

$$M_1 - M_2 = \varepsilon \quad (30)$$

$$K_1 \cdot B - K_4 \cdot V^2 = \varepsilon \quad (31)$$

Rearranjando a equação e supondo que g é muito menor que M_1 ou M_2 (o que significa que o ganho de malha é alto) tem-se:

$$V = \sqrt{B(K_1 / K_4)} \quad (32)$$

Este resultado mostra que, a tensão de realimentação é a raiz quadrada do campo magnético se for suposto que as funções de transferência K_1 , K_2 , K_3 e K_4 são lineares.

Desde que, a malha de realimentação capacitiva foi descoberta, houve uma tendência a utilizar capacitores de realimentação.

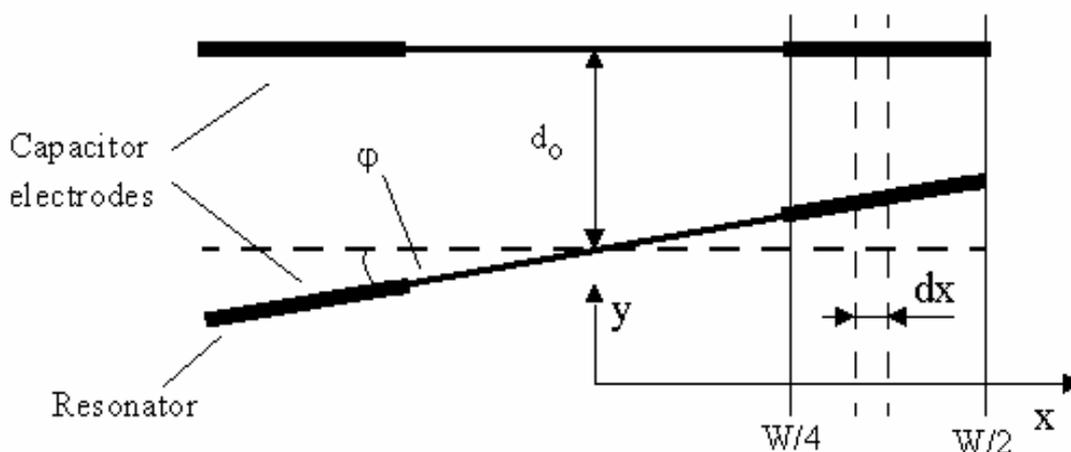


Figura 25: Arranjo e dimensões do capacitor de detecção

Os capacitores de realimentação podem ser construídos junto com os capacitores de detecção ao mesmo tempo, sem acrescentar o número de passos de produção, necessários a fabricação do equipamento. O capacitor de detecção é

muito adaptado aos requisitos de ajuste de zero, porque se não existe campo magnético, o ressonador não vibrará devido a ausência de torque, assim a alteração da capacitância correspondente não sofrerá alteração. Uma característica muito importante do sistema de detecção capacitivo é sua insensibilidade às mudanças de temperatura. Entretanto, este tipo de detecção possui uma resposta não linear em grandes amplitudes de vibração. Considere o conjunto capacitivo de detecção mostrado na Fig. 25. Pode-se calcular a alteração da capacitância como função do ângulo de deslocamento (ϕ).

$$\Delta C(\phi) = C(\phi) - C(\phi = 0) \quad (33)$$

A capacitância do capacitor básico é fácil de calcular:

$$C(\phi = 0) = \varepsilon_o \frac{LW}{4d_o} \quad (34)$$

Nesta fórmula L é a outra dimensão do eletrodo capacitivo. Para calcular $C(\phi)$ deve-se considerar uma elementar parte do capacitor caracterizada por um elemento capacitivo com largura dx na posição x :

$$dC = \varepsilon_o \frac{Ldx}{d(x)} \quad (35)$$

onde $d(x)$ é a distância entre as placas na posição x . A distância pode ser calculada como:

$$d(x) = d_o - x \cdot \tan(\phi) \quad (36)$$

Se ϕ for pequeno e $W \gg d_o$, pode-se obter a capacitância total integrando a Eq. (36):

$$C(\phi) = \int_{-W/4}^{W/2} \frac{\varepsilon_o L}{d_o - x \cdot \tan(\phi)} dx \quad (37)$$

Após a integração, C tomará a seguinte forma:

$$C(\phi) = \frac{\varepsilon_o L}{-\tan(\phi)} \ln \left[\frac{d_o - \frac{W}{2} \cdot \tan(\phi)}{d_o - \frac{W}{4} \cdot \tan(\phi)} \right] \quad (38)$$

Assim, a mudança da capacitância é dada por:

$$\Delta C(\varphi) = \frac{\varepsilon_o L}{-\tan(\varphi)} \ln \left[\frac{d_o - \frac{W}{2} \cdot \tan(\varphi)}{d_o - \frac{W}{4} \cdot \tan(\varphi)} \right] - \varepsilon_o \frac{LW}{4 \cdot d_o} \quad (39)$$

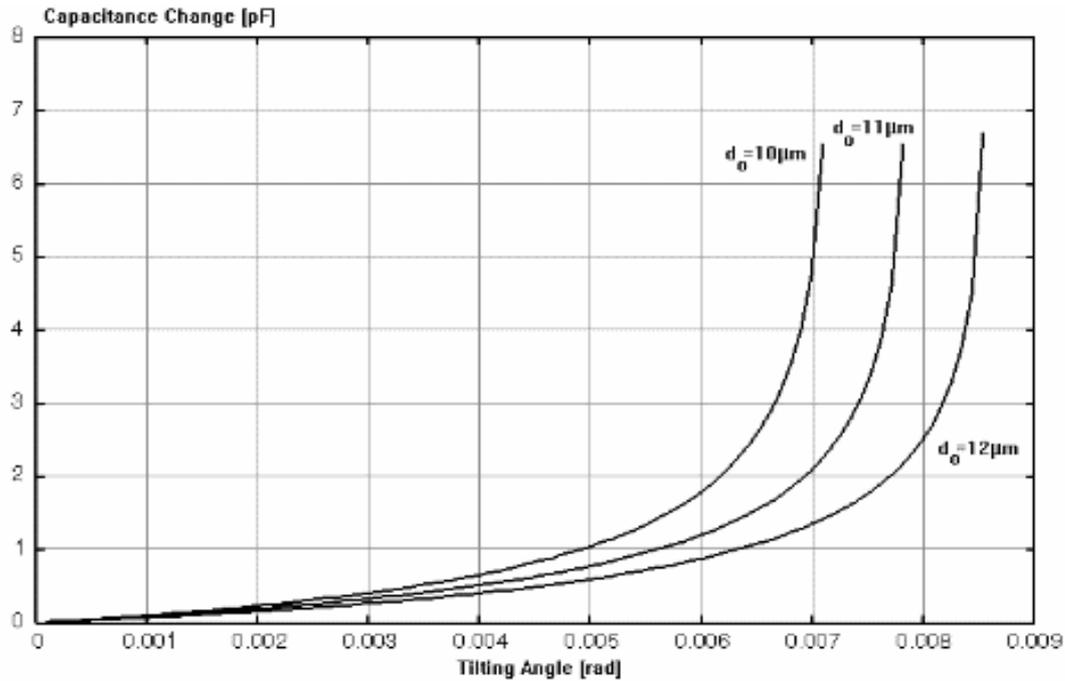


Figura 26: Alteração na capacitância do capacitor de detecção, para largos ângulos de deslocamento e diferentes distâncias entre as placas. ($W=2800 \mu\text{m}$, $L=1400 \mu\text{m}$)

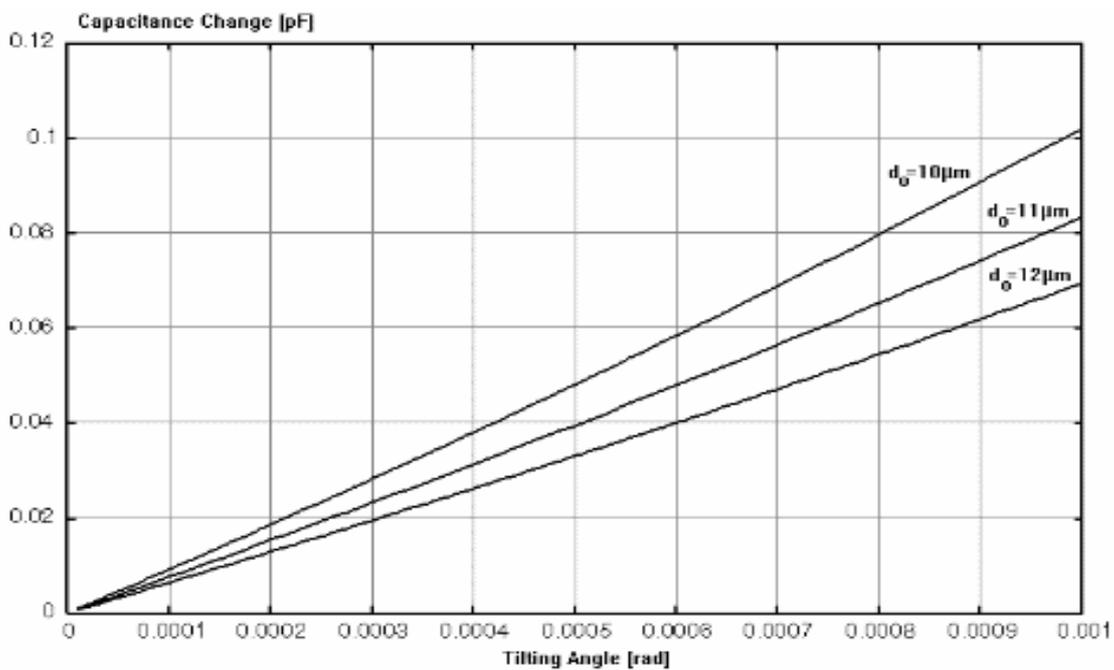


Figura 27: Alteração na capacitância do capacitor de detecção, para pequenos ângulos de deslocamento e diferentes distâncias entre as placas. ($W=2800 \mu\text{m}$, $L=1400 \mu\text{m}$)

Pode ser observado através das Fig. 26 e 27 que, a mudança da capacitância é não linear em função do ângulo de deslocamento. Entretanto, é razoavelmente linear se o ângulo de deslocamento é mantido em baixo valor e neste caso se, é usado malha de realimentação negativa.