

TORQUÍMETRO PARA MOTORES ULTRA-SÔNICOS

Nazem Nascimento

Erik Gerst

Adolfo Gomes Marto *

Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”

Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá

Universidade Estadual de Campinas UNICAMP *

Faculdade de Engenharia Mecânica

Resumo

Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um torquímetro para medir torques pequenos de motores com pouca potência e velocidade pequenas, como de motores ultra-sônicos. São apresentados vários tipos de torquímetros, descrevendo suas vantagens e desvantagens, e com mais detalhes o torquímetro desenvolvido. Esse torquímetro é composto por um suporte apoiado através de dois pares de molas cruzadas. Extensômetros são colocados na superfície de cada mola para medir as deformações por mola. O torque é calculado através da relação entre as deformações das molas.

Palavras-chave: torquímetro, medição, teste, motor ultra-sônico, extensômetros, molas cruzadas

1. INTRODUÇÃO

A miniaturização de equipamentos está cada vez mais intensa. Motores mais compactos e com características bem conhecidas são necessários. São pequenos motores que possibilitam o conforto no cotidiano, como os utilizados em equipamentos de acionamento remoto.

Os motores ultra-sônicos vêm sendo estudados como possíveis substitutos de motores eletromagnéticos convencionais, por exemplo. Esses motores têm uma construção simples, são compactos, produzem um torque alto em relação à massa que possuem, com uma velocidade reduzida e, além de tudo isso, são silenciosos. Vários tipos desse motor são apresentados por (Marto, 1997). Basicamente funcionam através de uma estrutura vibrando com frequências acima da audível em contato com outra estrutura, geralmente estator e rotor respectivamente. Os deslocamentos elípticos gerados pela vibração e as forças de atrito no contato movimentam o rotor, fazendo o motor funcionar.

Para medir as características desses motores, ou de outro com pequenas dimensões, é necessário um torquímetro capaz de medir desde pequenos torques e velocidades. Os torquímetros apresentados neste trabalho foram discutidos em detalhes por (Gerst, 1997). Aqui são abordados princípios de funcionamento, vantagens e desvantagens dos seguintes torquímetros: Torquímetro por emissão e recepção de laser, Torquímetro por intensidade luminosa, Torquímetro por “Transformador Diferencial de Variável Linear”, Torquímetro por extensômetros, Torquímetro por feixe de molas cruzadas. Para medir o torque de motores ultra-sônicos foi projetado um torquímetro por feixe de molas, cujos dimensionamentos, também, são apresentados.

2. PRINCÍPIOS DE MEDIÇÃO

Torquímetro por emissão e recepção de laser

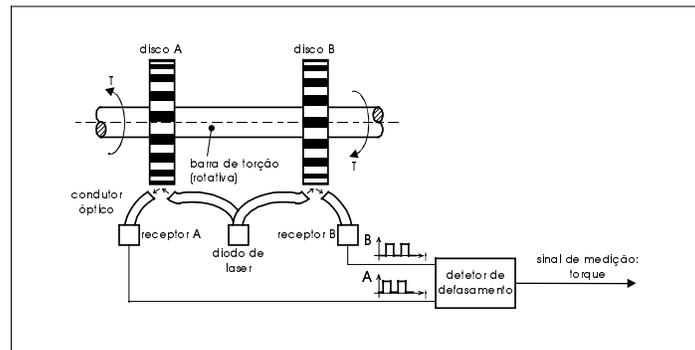


Figura 1: Torquímetro por emissão e recepção de laser

Esse torquímetro é composto por dois discos presos ao eixo, um diodo, dois receptores de raio laser e um detector de defasamento, como apresentado na figura 1. A superfície cilíndrica de cada disco é segmentada alternadamente pelas cores branco e preto. Um diodo de raio laser emite a luz contra os segmentos desenhados no cilindro. Quando o eixo está girando, cada receptor percebe a reflexão da luz incidente nos cilindros em pulsos e gera um sinal elétrico com a mesma frequência dos pulsos. Um detector de defasamento indica a diferença de fase existente entre os dois sinais elétricos.

Se não houver torque entre os discos, os sinais estarão em fase. Havendo torque, existirá uma diferença de fase proporcional à intensidade do torque.

A construção desse torquímetro exige poucos componentes e é simples. Ocupam pouco espaço. Com esse instrumento é possível medir torques e velocidade angulares sem a interferência de forças de contato. Porém não é possível a medir o torque com o motor travado. O tamanho da defasagem depende da velocidade angular.

Torquímetro por intensidade luminosa

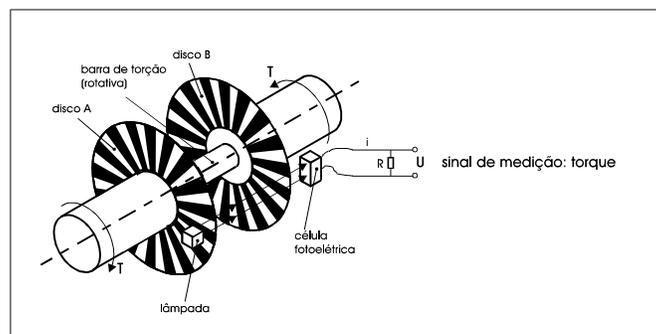


Figura 2: Torquímetro por intensidade luminosa

Dois discos transparentes segmentados radialmente em conjunto com um diodo luminoso, uma célula fotoelétrica e um medidor de voltagem compõe esse torquímetro, como mostra a figura 2. Quando o eixo gira, uma parcela da luz emitida pelo diodo é sentida pela célula fotoelétrica.

A intensidade luminosa percebida pela célula fotoelétrica é de 50% quando não há torque. Na presença de torque, a intensidade luminosa varia, devido ao movimento relativo entre os discos. A intensidade luminosa varia para mais ou menos dependendo do sentido do torque. A célula fotoelétrica transforma a intensidade luminosa num sinal elétrico com a

voltagem proporcional à intensidade de luminosidade. Com um medidor de voltagem é possível medir o torque associado à variação da luminosidade.

Trata-se de um instrumento compacto, simples e de baixo preço. No entanto, possui alta sensibilidade, pois a célula fotoelétrica registra diretamente, de forma proporcional, a intensidade do torque sem a necessidade de contato. Não depende da velocidade angular. A limitação deste torquímetro é quando o eixo está travado, pois esse não responde.

Torquímetro por “Transformador Diferencial de Variável Linear”

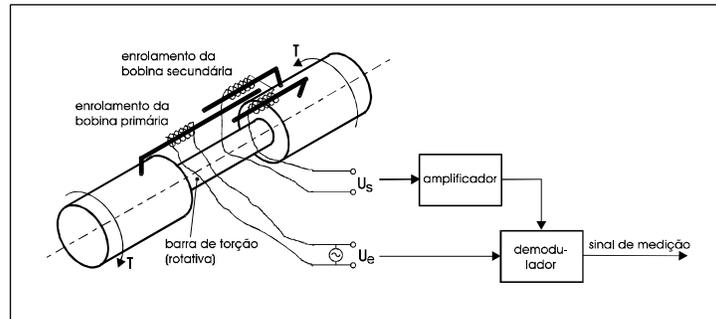


Figura 3: Torquímetro por transformador diferencial de variável linear

Esse torquímetro utiliza um princípio eletromagnético conhecido como transformador diferencial de variável linear, em inglês: *Linear Variable Differential Transformers*, ou abreviado por *LVDT*. A figura 3 apresenta uma bobina primária e duas secundárias enroladas em hastes metálicas fixas ao eixo. A haste da bobina primária está equidistante entre as hastes das secundárias.

Aplicando-se um torque, a bobina primária ficará mais próxima de uma das bobinas secundárias. Desta forma, uma bobina secundária transformará a tensão num sinal maior ou menor do que o sinal transformado pela outra bobina secundária. A diferença de voltagem entre os dois sinais é proporcional ao torque aplicado ao eixo.

Apesar de ser um instrumento de alta sensibilidade, é muito complexa a montagem eletrônica e magnética. Não permitem medir o torque quando há velocidade angular

Torquímetro por extensômetros

O recurso utilizado para medir torque nesse instrumento é a extensometria. Quatro extensômetros são colados ao eixo, como apresentado na figura 4. Para permitir a medição quando o eixo gira à uma velocidade angular, os sinais são coletados por um mecanismo de escovas. Os extensômetros formam uma ponte de resistências elétricas equilibrada, ou ponte de *Wheatstone*. Os sinais são amplificados e filtrados.

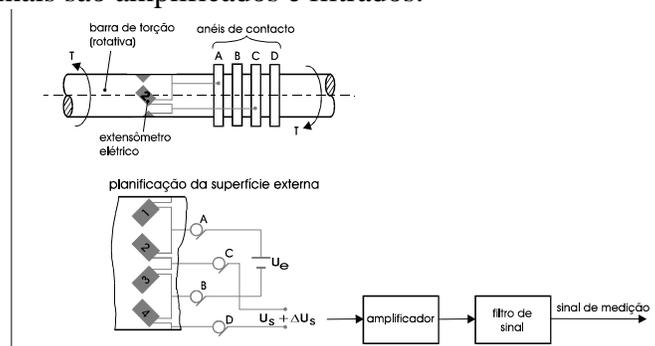


Figura 4: Torquímetro por extensômetros elétricos

Quando o eixo está submetido a algum torque ocorre deformações ao longo do eixo. As deformações causam variações proporcionais das resistências elétricas nos extensômetros. Essas variações de resistências desequilibram a ponte de Wheatstone. A diferença de potencial provocada pelo equilíbrio é proporcional ao torque.

A resposta desse instrumento é rápida. A medição do torque independe da direção de rotação e da velocidade angular. Porém o mecanismo de escovas interfere na medição final. Um amplificador de corrente contínua é necessário para aumentar o sinal de medição e para torques pequenos é muito difícil filtrar o sinal do ruído.

Torquímetro por feixe de molas cruzadas

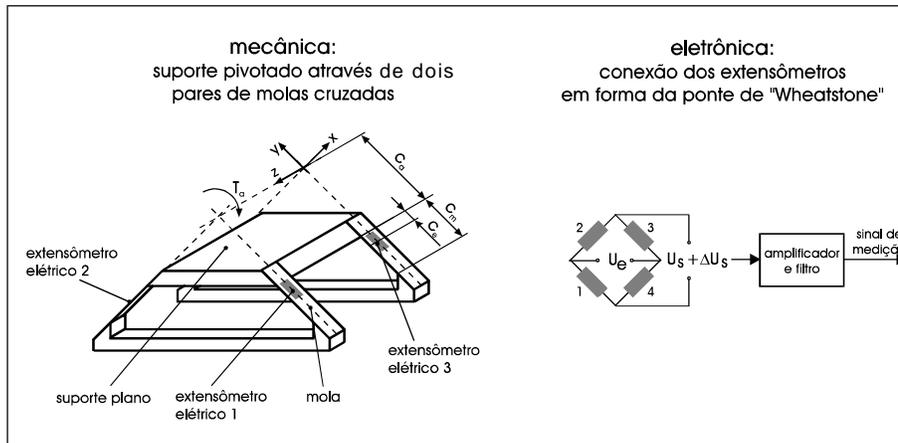


Figura 5: Torquímetro por feixe de molas cruzadas

Nesse torquímetro, um suporte é apoiado por um conjunto de 4 molas, como apresentado na figura 5. A linha de simetria do suporte passa pelas intersecções dos prolongamentos das linhas de ação das molas. Em cada mola é colado um extensômetro. Os extensômetros são ligados em forma de ponte de Wheatstone equilibrada.

Quando um eixo apoiado por esse suporte é submetido a um torque, as molas fletem de formas diferentes. A deformação provocada por cada mola varia a resistência elétrica dos extensômetros. O desequilíbrio provocado na ponte de Wheatstone gera uma voltagem proporcional ao torque.

Esse instrumento responde de forma rápida. A medição é proporcional à tensão produzida nas molas e independe da velocidade angular do eixo. Não existe influência do contato nas medidas. O sinal é muito pequeno e necessita de um amplificador de corrente contínua. Quando o torque é muito pequeno é muito difícil filtrar o sinal das perturbações externas.

3. TORQUÍMETRO PARA O MOTOR ULTRA-SÔNICO

Motor ultra-sônico produz torque com o eixo travado. Seu desempenho depende da velocidade angular, que é pequena. São motores compactos, assim o instrumento de medição, deve ser compacto ou externo ao motor. Dessa forma, escolheu-se o torquímetro por feixe de molas.

Para que o instrumento tenha uma boa sensibilidade é necessário dimensionar as molas de apoio do suporte.

Dimensionamento das molas

As molas utilizadas no Torquímetro por Feixe de Molas, TFM, são iguais. São molas planas de forma retangular. O instrumento tem que ter boa sensibilidade, pois a faixa de grandeza de torque que vai ser medida é pequena. Portanto é necessário obter uma relação entre o comprimento, c_m , a largura, b , e a espessura, h , da mola em função do tipo de solicitação que vão ter.

Tomando como objetivo obter o comprimento da mola, c_m , em função de suas outras dimensões, b e h . A tabela 1 apresenta as dimensões preliminares para calcular o comprimento da mola. Recorre-se a uma chapa de espessura, h , com as propriedades de elásticas conhecidas. Localiza-se as molas em relação ao eixo de simetria do motor, bem como a posição das molas. Especifica-se os extensômetros com a sensibilidade desejada e seus fatores de proporcionalidade. Limita-se o torque máximo por um torque que produz um ângulo de torção, β .

Tabela 1: Parâmetros para calcular o comprimento, c_m , da mola

material da mola	módulo de elasticidade do material	$E = 2,069 \cdot 10^{11} \text{ N/m}^2$
Dimensão inicial	espessura	$h = 0,53 \text{ mm}$
braço de alavanca do suporte		$c_a = 50 \text{ mm}$
distância de extremidade da mola ao centro do extensômetro		$c_e = 5 \text{ mm}$
quantidade das molas		$n = 4$
fator dos extensômetros		$k = 2,1$
relação das tensões da ponte de "Wheatstone"		$\Delta U_s/U_e = 0,002$
torque de carga		$T_a = 2 \text{ Nm}$
ângulo de torção máximo		$\beta = -0,5^\circ = -8,72 \cdot 10^{-3} \text{ rad}$

O lado esquerdo da figura 6 mostra a deformação de um par de molas cruzadas pela ação do torque de carga, T_a , no suporte plano, (A cor cinza marca a forma das molas quando $T_a=0$ Nm). O lado direito esquematiza as forças e os torques que são gerados quando o torque de carga é executado. Obs.: As forças, F_{vr} e F_{hr} são as forças de apoio.

Da condição de equilíbrio estático, obtém-se as equações 1, 2 e 3:

$$\sum T = 0 \Rightarrow -T_a + n \cdot T_b + n \cdot F_b \cdot c_a = 0 \quad (1)$$

$$\sum F_x = 0 \Rightarrow F_{hr} \cdot \sin 45^\circ + F_{vr} \cdot \cos 45^\circ + \frac{n}{2} \cdot F_b = 0 \quad (2)$$

$$\sum F_y = 0 \Rightarrow -F_{hr} \cdot \cos 45^\circ + F_{vr} \cdot \sin 45^\circ - \frac{n}{2} \cdot F_b = 0 \quad (3)$$

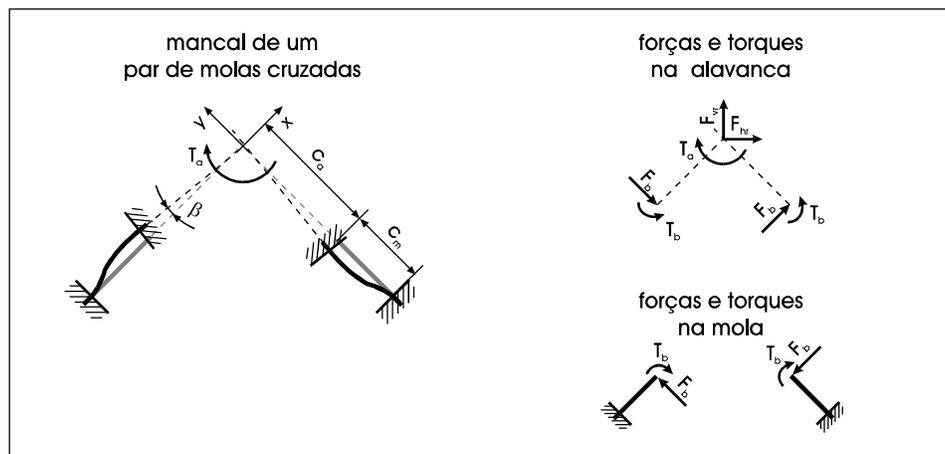


Figura 6: Forças e torques nas molas cruzadas

Para resolver este sistema de equações é necessário calcular a relação entre a força, F_b , e o torque, T_b , que causam flexão na mola. Isso é representado na figura 7.

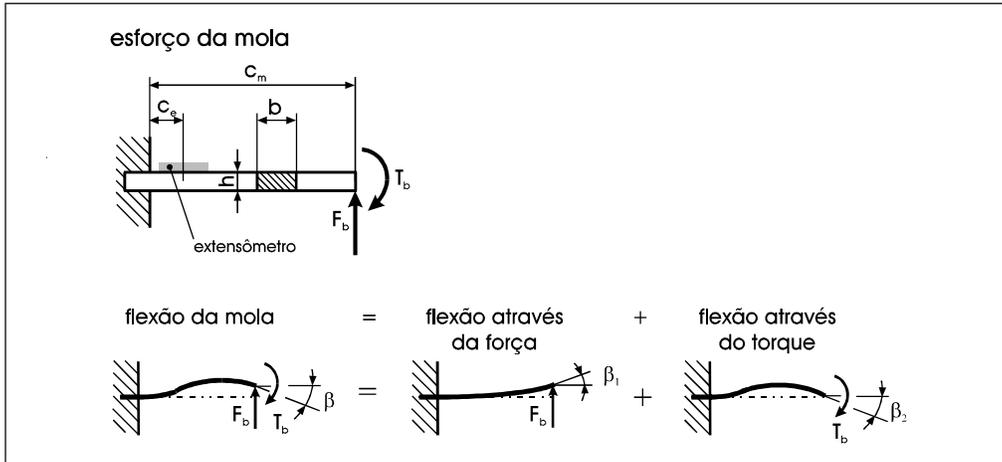


Figura 7: Flexão da mola

O momento, $T_{(z)}$, devido a força, F_b , é dado pela equação 4

$$T_{(z)} = F_b \cdot z \quad (4)$$

A equação 5, apresenta a deslocamento angular, β_1 , causada por essa força, sendo que o momento de inércia em relação a x , I_x , é expresso pela equação 6:

$$\beta_1 = \frac{1}{E \cdot I_x} \cdot \int_0^{c_m} F_b \cdot z \cdot dz = \frac{F_b \cdot c_m^2}{2 \cdot E \cdot I_x} \quad (5)$$

$$I_x = \frac{b \cdot h^3}{12} \quad (6)$$

O momento, $T_{(z)}$, causado pelo torque, T_b , apresentado pela equação 7, possui um deslocamento angular expresso pela equação 8:

$$T_{(z)} = -T_b \Rightarrow \frac{\partial T_{(z)}}{\partial T_b} = -1 \quad (7)$$

$$\beta_2 = \frac{1}{E \cdot I_x} \cdot \int_0^{c_m} (-T_b) \cdot \frac{\partial T_{(z)}}{\partial T_b} \cdot dz = \frac{T_b \cdot c_m}{E \cdot I_x} \quad (8)$$

A relação entre T_b e F_b é obtida através da adição dos ângulos de flexão, como apresentado na equação 9:

$$\beta = \beta_1 - \beta_2 \Rightarrow T_b = \frac{F_b \cdot c_m}{2} - \frac{E \cdot I_x}{c_m} \cdot \beta \quad (9)$$

A força, F_b , é calculada através da equação 9 e do sistema de equações 1, 2 e 3, resultando a expressão 10:

$$F_b = \frac{1}{n \cdot (c_m/2 + c_a)} \cdot (T_a + \frac{E \cdot I_x \cdot n}{c_m} \cdot \beta) \quad (10)$$

O comprimento da mola, c_m , é calculado através da relação entre a deformação e as tensões mecânica na mola, como também da relação entre a deformação e a diferença de potencial elétrica desejada no desequilíbrio da ponte de Wheatstone, expressas pela equação 11. A tensão mecânica em função do potencial elétrico é apresentada pela expressão 12

$$\sigma = \varepsilon \cdot E \quad \text{com} \quad \varepsilon = \frac{1}{k} \cdot \frac{\Delta U_s}{U_e} \quad (11)$$

$$\sigma = \frac{E}{k} \cdot \frac{\Delta U_s}{U_e} \quad (12)$$

Conhecendo a tensão devido ao momento de flexão, dada pela equação 13, a linha neutra da chapa expressa por 14, e o momento de flexão dado por 15

$$\sigma = \frac{T_f \cdot e}{I_x} \quad (13)$$

$$e = \frac{h}{2} \quad (14)$$

$$T_f = F_b (c_m - c_e) - T_b \quad (15)$$

obtem-se o comprimento da mola desejado expresso por 16

$$c_m = \frac{k b h^3}{2 b h^2 E \left(\frac{\Delta U_s}{U_e} \right)^n - 12 k T_a} \left[E n \beta - \frac{12 T_a c_e}{b h^3} - \frac{2 E \left(\frac{\Delta U_s}{U_e} \right)^n c_a}{k h} \right] \pm \sqrt{\left(\frac{2 E \left(\frac{\Delta U_s}{U_e} \right)^n c_a}{k h} + \frac{12 T_a c_m}{b h^3} - E n \beta \right)^2 - 4 E n \beta (c_e - c_a) \left(\frac{E \left(\frac{\Delta U_s}{U_e} \right)^n}{k h} - \frac{6 T_a}{b h^3} \right)} \quad (16)$$

4. RESULTADOS OBTIDOS

Dois tipos de molas foram calculados utilizando o mesmo material, porém com larguras diferentes. Os resultados são apresentados na tabela 2.

Tabela 2: Principais dimensões das molas

Tipo de mola	Largura [mm]	Comprimento [mm]
1	6,0	25,4
2	7,0	28,2

A curva de resposta teórica do torquímetro foi levantada a partir das equações 11 e 12. O torque esperado em função da diferença de potencial apresentada na ponte é expresso pela equação 17.

$$T = \left[\frac{2EI(8c_a + 4c_m)}{h k c_m U_e} \right] \Delta U_s \quad (17)$$

O torquímetro foi calibrado utilizando massas padrões presas em um braço equilibrado. Este braço foi construído exclusivamente para calibrar o torquímetro. Ele é acoplado ao torquímetro no mesmo lugar de fixação do motor ultra-sônico, de tal maneira a não acrescentar momento ao eixo de simetria. O braço é graduado para fornecer medida do torque padrão com maior precisão. A curva de calibração utilizando o grupo de molas com comprimento de 7 [mm] é apresentada pela figura 4

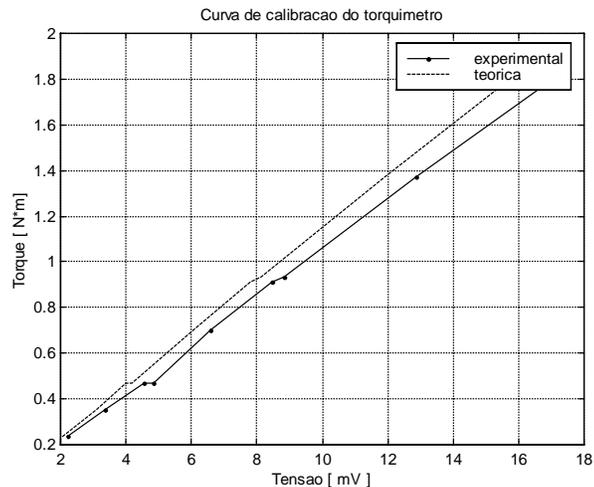


Figura 8: Curva de calibração do torquímetro para motor ultra-sônico

5. CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou torquímetros para motores de baixa potência. Tendo em vista a curva característica de um motor ultra-sônico, optou-se pelo torquímetro por feixe de molas cruzadas. Este torquímetro é capaz de medir o comportamento do motor em diversas condições. Desde o motor inteiramente travado até totalmente livre.

Para a construção deste torquímetro, dimensionou-se as molas para atender a uma faixa de torque esperada pelo motor. A curva de calibração apresenta o comportamento do torquímetro dentro da faixa esperada. Ocorreu um erro proporcional ao fundo de escala de 5%. Este erro não compromete as medições.

6. BIBLIOGRAFIA

- Blutaumüller, Karlheinz: *Estudo da aplicação de dois Torquímetros ópticos para medições dinâmicas*, Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos-SP, 1971
- Foskett, Roger; 1968: Torque Measuring Transducers, *Instruments & Control Systems* v. 41(11), p. 75-77
- Doebelin, E.; 1990 *Measurement Systems: Application and Design*, McGraw-Hill Publishing Company, 992 p.
- Figliola, R.; Beasley, D.; 1994 *Theory and Design for Mechanical Measurements*, Portland: John Wiley & Sons, 624 p..
- Gerst, E.; 1997 *Travelling-wave Ultrasonic Motor – Descrição do princípio de acionamento e projeto de uma bancada de teste* Guaratinguetá: Universidade Estadual de São Paulo UNESP (Trabalho de Graduação), 147p.
- Marto, A. G., 1997 *Motores ultra-sônicos: princípios de funcionamento e características* Guaratinguetá, (Dissertação de Mestrado) UNESP – Guaratinguetá. 145 p.
- Pahl, G.; Beitz, W.; 1993 *Konstruktionslehre: Methoden und Anwendung*, Springer-Verlag.
- Trylinski, W.; 1971 *Fine mechanisms and precision instruments*. Pergamon Press, Oxford, 525 p.