



MOTOR POR ONDAS PROPAGANTES

Adolfo Gomes Marto

agmarto@fem.unicamp.br

Pablo Siqueira Meirelles

pablo@fem.unicamp.br

Universidade Estadual de Campinas, Departamento de Mecânica Computacional

Cx. P. 6122 – 13083-970 – Campinas, SP, Brasil

Resumo. *Recentemente tem-se desenvolvido motores que utilizam vibrações para gerar forças de acionamento. A frequência de acionamento é em geral ultra-sônica, o que resulta num funcionamento silencioso ao ouvido humano. Por esta razão estes dispositivos são freqüentemente chamados motores ultra-sônicos. O motor por ondas propagantes é o mais promissor entre os motores ultra-sônicos por apresentar uma concepção simples, ser compacto, produzir altos torques em relação à massa que possuem e operar a baixas velocidades. Sua utilização em mecanismos de acionamento remoto vem sendo cada vez mais pesquisada. Algumas aplicações comerciais, como em objetivas autofocantes de máquinas fotográficas, já são empregadas. Este trabalho apresenta os princípios básicos de funcionamento deste motor, e descreve as etapas de concepção, dimensionamento, construção e testes de um protótipo sônico.*

Palavras-chave: *Motor ultra-sônico, onda propagante, piezoelectricidade.*

1. INTRODUÇÃO

O motor ultra-sônico utiliza vibração com frequências acima da audível para gerar força de acionamento. É composto basicamente por apenas duas peças mantidas em contato sob pressão. Em uma das peças, geralmente o estator, é induzida vibração.

A energia elétrica é convertida em energia mecânica de deformação no estator por um material piezoelétrico. As forças de atrito que ocorrem no contato entre o estator e o rotor produzem a força de acionamento.

Wallaschek (1995) discorre sobre os 50 anos de estudo do motor ultra-sônico e as evoluções que incentivaram a pesquisa desses motores, tais como os avanços em eletrônica fina e o surgimento de materiais mais adequados para a conversão eletro-mecânica a alta frequência.

Marto (1997) apresenta alguns princípios de funcionamento desses motores, entre eles o motor ultra-sônico por ondas propagantes. Sashida desenvolveu esse tipo de motor em 1982. Esse motor é apresentado por Ueha *et al.* (1993). No estator são geradas ondas propagantes que são transformadas em deslocamentos elípticos na superfície de contato. As forças de

atrito transmitem movimento ao rotor. Segundo Maeno *et al.* (1992), as principais características desses motores são: funcionamento silencioso, alto torque em relação à massa que possuem, baixa velocidade e boa controlabilidade.

Devido a essas características, esse motor vem sendo empregado em mecanismos de ajuste de posição, por exemplo: ajuste de encosto de cabeça e movimentação de vidro lateral em automóveis encontrado em DaimlerBenz (1995), ajuste de foco utilizado em objetivas autofocantes Canon (1996).

Hagedorn & Wallaschek (1992) desenvolve um modelo matemático do estator utilizando a teoria de placas com hipótese de Kirchoff. Hagedorn (1997) apresenta uma modelagem completa do motor ultra-sônico por ondas propagantes englobando o modelo do estator, o acoplamento eletromecânico da cerâmica piezoelétrica e uma modelagem viscoelástica do contato mecânico entre o rotor e o estator.

Este trabalho desenvolve um protótipo de motor sônico. Inicialmente descreve o princípio de geração de uma onda propagante num anel através da excitação de duas ondas estacionárias e o mecanismo pelo qual os deslocamentos elípticos surgem na superfície de contato e como se transformam em força de acionamento. Foi construído um protótipo de motor sônico adaptando às dimensões fornecidas por Hirata & Ueha (1995) para evidenciar a utilização de ondas propagantes como meio motor.

2. PRINCÍPIOS DE FUNCIONAMENTO

2.1 Modos de vibrar de um anel

Devido à simetria, um anel tem inúmeras famílias de modos de vibrar acoplados, ou modos degenerados. Cada família de modos vibra com a mesma frequência e os modos possuem formas semelhantes de vibrar. Estas formas são ondas estacionárias e podem ser combinadas para gerarem uma onda propagante no anel.

Os deslocamentos transversais de um anel, estudado pela teoria de Kirchoff-Love de placas, satisfazem a equação diferencial Eq. (1), apresentada por Meirovitch (1967):

$$D\nabla^4 W(r, \theta, t) + \frac{\partial^2 W(r, \theta, t)}{\partial t^2} = q(r, \theta, t) \quad (1)$$

Um anel de altura, h , de um material com densidade, ρ , módulo de elasticidade de Young, E , e coeficiente de Poisson, ν , possui sua rigidez à flexão, D , definida por:

$$D = Eh^3/12(1-\nu^2) \quad (2)$$

O operador diferencial bi-harmônico apropriado é expresso, em coordenadas cilíndricas, por:

$$\nabla^4 = \nabla^2 \nabla^2 = \left(\frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2}{\partial \theta^2} \right) \left(\frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2}{\partial \theta^2} \right) \quad (3)$$

Hagedorn & Wallaschek (1992) consideram um anel sujeito a condições de contorno que sejam independentes do ângulo θ , para que a simetria circular do problema seja conservada. O interesse é identificar, inicialmente, os modos naturais de vibrar do anel. Para isso, o anel é estudado livre de esforços externos, $q(r, \theta, t) = 0$.

Devido à simetria do problema, as soluções da Eq. (1) são do tipo:

$$w(r, \theta, t) = R(r) \cos(\xi \theta) \cos(\omega t) \quad (4)$$

Os valores de ω e R são obtidos da solução de um problema de autovalores, sendo que ω são as frequências naturais e $R(r)$ são as funções de Bessel modificadas. As autofunções que fornecem as formas de vibrar são classificadas em função do número de diâmetros nodais, ξ , e círculos nodais, ζ . Para exemplificar esta classificação são apresentados alguns modos de um anel fixo pelo diâmetro interno na Fig. 1, extraída de Hagedorn & Wallaschek (1992).

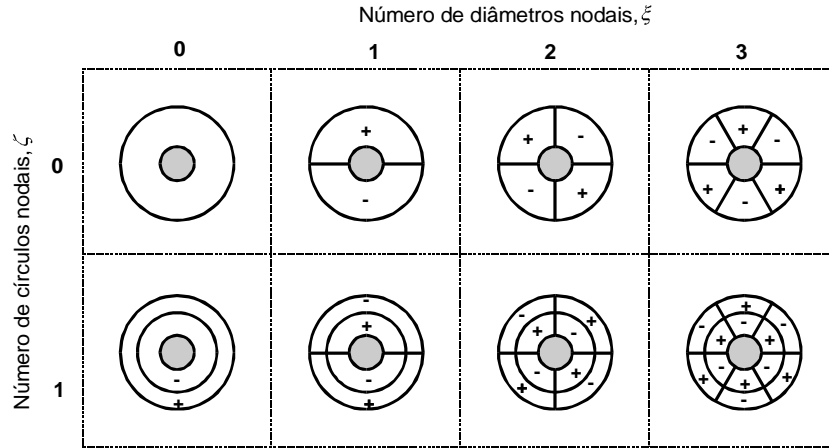


Figura 1 Modos de vibrar de um anel fixo pelo diâmetro interno

2.2 Obtenção da onda propagante

As formas naturais de vibrar do anel são estacionárias, ou seja, as linhas nodais não tem sua posição alterada com o tempo. Uma onda estacionária que possua a forma expressa pela Eq. (4), também pode ser representada por duas ondas propagantes em sentido contrário:

$$w(r, \theta, t) = R(r) \cos(\xi \theta) \cos(\omega t) = \frac{1}{2} R(r) [\cos(\xi \theta + \omega t) + \cos(\xi \theta - \omega t)] \quad (5)$$

Como já foi visto, um anel possui inúmeros modos degenerados com formas semelhantes de vibrar. As Eq. (6) e (7) representam dois destes modos com diferenças de fases no tempo e no espaço:

$$w_1(r, \theta, t) = \frac{1}{2} R(r) [\cos(\xi \theta + \omega t) + \cos(\xi \theta - \omega t)] \quad (6)$$

$$w_2(r, \theta, t) = \frac{1}{2} R(r) \left\{ \cos[\xi (\theta + \Delta\theta) + \omega (t + \Delta t)] + \cos[\xi (\theta + \Delta\theta) - \omega (t + \Delta t)] \right\} \quad (7)$$

Superpondo estes dois modos obtém-se a forma de vibrar descrita na Eq. (8)

$$w(r, \theta, t) = \frac{1}{2} R(r) \left\{ \cos(\xi \theta + \omega t) + \cos[(\xi \theta + \omega t) + (\xi \Delta\theta + \omega \Delta t)] + \cos(\xi \theta + \omega t) + \cos[(\xi \theta - \omega t) + (\xi \Delta\theta - \omega \Delta t)] \right\} \quad (8)$$

Para as relações de fases da Eq. (9):

$$\xi \Delta\theta + \omega \Delta t = m\pi \quad , \quad \xi \Delta\theta - \omega \Delta t = n\pi \quad (9)$$

as formas de vibrar com valores inteiros de m e n têm as características descritas na Tabela (1):

Tabela 1- Principais formas de ondas excitadas por dois modos degenerados

Natureza de m	Natureza de n	Forma de vibrar	Característica da onda
Par	Par	$R(r)[\cos(\xi\theta + \omega t) + \cos(\xi\theta - \omega t)]$	Onda estacionária
Ímpar	Par	$R(r)\cos(\xi\theta - \omega t)$	Onda propagante regressiva
Par	Ímpar	$R(r)\cos(\xi\theta + \omega t)$	Onda propagante progressiva
Ímpar	Ímpar	0	Onda nula

Desta maneira obtém-se as diferenças de fase apropriadas para excitar ondas propagantes:

$$\Delta\theta = \frac{(n-m)\lambda}{4} \quad , \quad \Delta t = \frac{(n+m)T}{4} \quad (10)$$

Sendo $\lambda = 2\pi/\xi$ o comprimento de onda (em radianos) e $T = 2\pi/\omega$ o período.

2.3 Deslocamento elíptico

Os deslocamentos da superfície neutra do anel submetido a onda propagante possuem apenas uma direção, a transversal. Para que haja um movimento orientado capaz de conduzir o rotor, os deslocamentos devem ocorrer fora da linha neutra, como apresentado na Fig. 2.

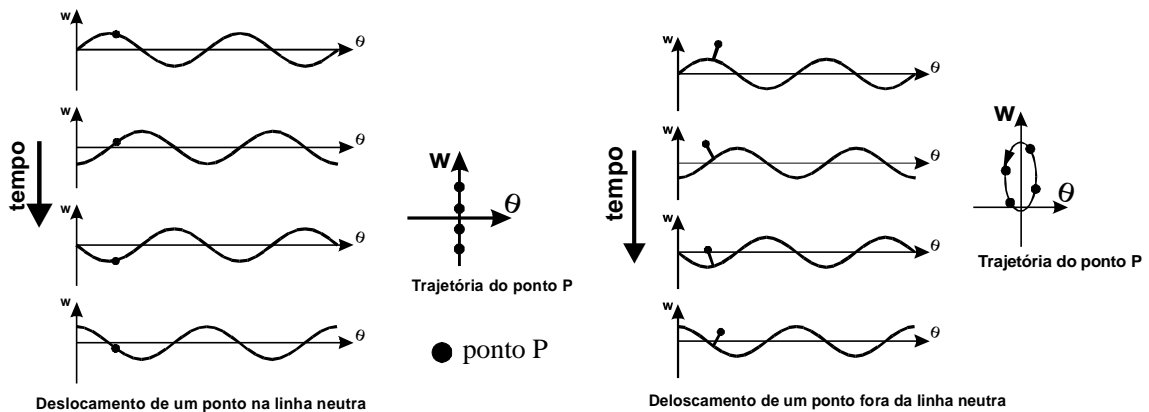


Figura 2 Deslocamentos em um anel sob ondas propagantes

A trajetória pode ser deduzida a partir da Fig. 3, de onde são calculados os deslocamentos angulares e transversais descritos nas Eq. (11) e (12).

$$u(r, \theta, h, t) \cong -h \frac{dv(\theta, h, t)}{dx} = -khR(r)\cos(\omega t - k\theta) \quad (11)$$

$$v(r, \theta, h, t) = w(\theta, t) + h \cos(\alpha) \cong R(r) \sin(\omega t - k \theta) + h \quad (12)$$

Desta forma a trajetória elíptica é facilmente deduzida pela Eq. (13).

$$\left[-\frac{u(r, \theta, h, t)}{khR(r)} \right]^2 + \left[\frac{v(r, \theta, h, t) - h}{R(r)} \right]^2 = \sin^2(\omega t - k \theta) + \cos^2(\omega t - k \theta) = 1 \quad (13)$$

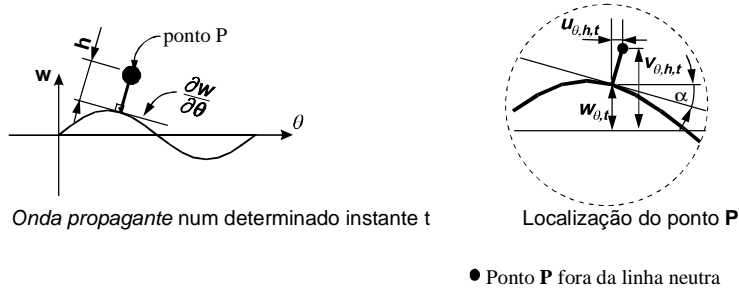


Figura 3 Representação geométrica dos deslocamentos do anel

2.4 Força de acionamento

A transmissão das forças de acionamento ocorre por um processo de rolagem dos pontos em contato. As ondas propagantes provocam uma distribuição de pressão de contato que varia com o tempo. Desta forma, a força normal de contato e também a força de atrito variam com o tempo.

$$\begin{cases} F_N = K_N [R(r) \cos(\omega t - k \theta) - \Delta z] \\ F_{at} = \mu K_N [R(r) \cos(\omega t - k \theta) - \Delta z] \end{cases} \quad (14)$$

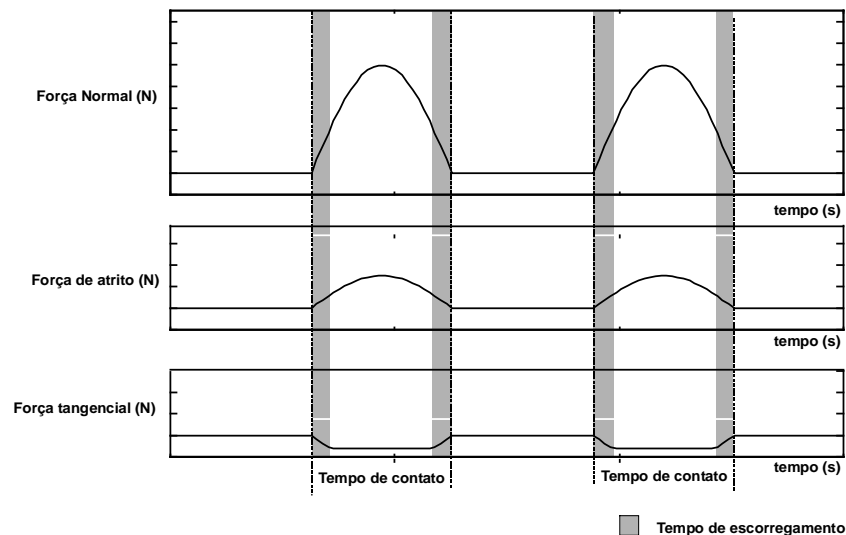


Figura 4 Variação de esforços de contato

Quando um ponto da superfície do estator entra em contato com o rotor, a velocidade tangencial é menor que a velocidade tangencial da superfície de contato do rotor. Esta situação tende a segurar o rotor, mas neste ponto a força de atrito não é suficiente para isto, há

um deslizamento entre as partes. Igual situação ocorre quando o ponto se desprende do rotor. Nas cristas da onda propagante, a força normal de contato é maior. Assim, a força de atrito é suficiente para não haver escorregamento, e o rotor é arrastado com a velocidade do ponto de contato do estator. O comportamento das forças é apresentado em gráficos na Fig. 4.

3. PROTÓTIPO SÔNICO

3.1 Estator

O modelo do estator para se estimar as frequências naturais foi desenvolvido por elementos finitos com elementos sólidos de oito nós, livre de restrições. Para resolver o problema de auto-valor foi utilizado o programa ANSYS®, versão 5.4. As dimensões preliminares do anel foram adaptadas de Hirata & Ueha (1995). A Tabela 2 apresenta as principais dimensões do estator.

Para aumentar a amplitude dos deslocamentos no sentido do acionamento do motor é considerado um anel com dentes, aumentado a distância dos pontos na superfície de contato à linha neutra.

Tabela 2 Principais dimensões do estator

Dimensões	
Diâmetro interno	60 [mm]
Diâmetro externo	80 [mm]
Altura do anel	7 [mm]
número de dentes	40 [dentes]
Altura do dente	3 [mm]
Largura do dente	6 [graus]
Material : Alumínio	
Módulo de Young	69×10^9 [N/m ²]
Densidade	2800 [Kg/m ³]

A Tabela 3 apresenta, dentre as 30 primeiras frequências naturais do estator, as frequências que têm modos de vibrar transversais. O modo destacado foi escolhido para ser o modo de excitação do motor. A Figura 5 apresenta a forma de vibrar deste modo.

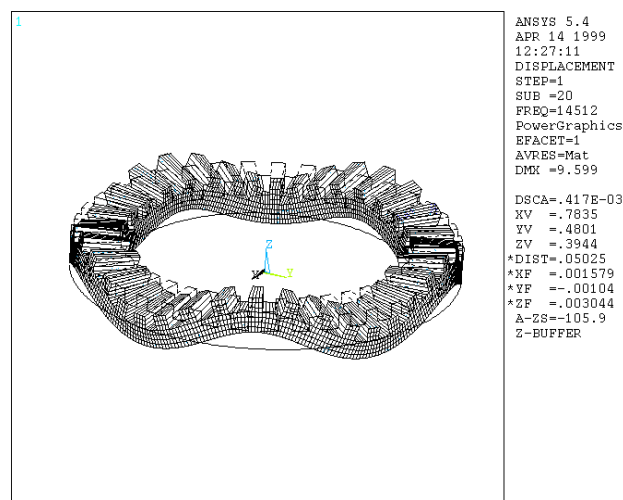


Figura 5 Modo transversal de vibrar com cinco diâmetros nodais

Tabela 3 Primeiras freqüências naturais de modos transversais do estator

Modo	Freqüência [Hz]
7-8	1819.7
11-12	4970.8
14-15	9254.1
20-21	14512
26-27	20584

Para excitar os modos adotados, com a respectiva diferença de fase angular entre si, cerâmicas piezoelétricas (PZT) foram coladas à face oposta dos dentes, com suas polaridades dielétricas dispostas como apresentado na Fig 6. Os atuadores representados por A1 até A4 excitam um modo e os representados por A5 até A8 o modo defasado do anterior. Quatro sensores, também de PZT, foram colados ao estator, e são representados por S1 até S4.

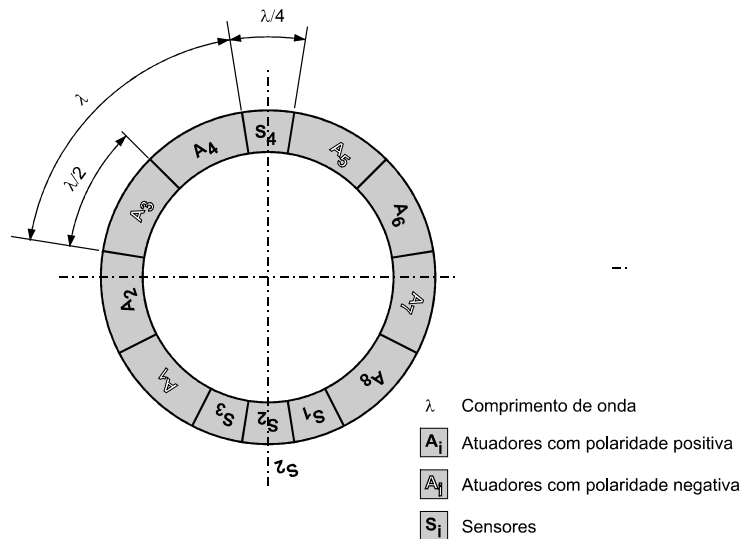


Figura 6 Configuração das cerâmicas piezoelétricas

3.2 Rotor

As dimensões foram estimadas de tal forma que o rotor fosse auto-centrante ao entrar em contato com o estator como apresentado na Fig. 7.

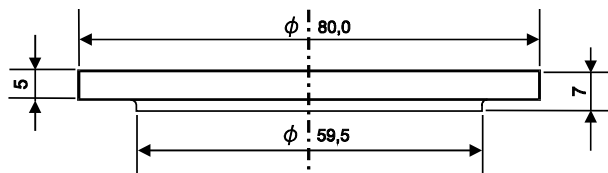


Figura 7 Rotor

3.3 Sinal

Para excitar duas ondas defasadas, foi usado um gerador de sinais com duas saídas independentes. Uma das saídas gerando uma onda em forma de seno e outra de co-senoidal.

Foi também utilizado um amplificador de sinais para aumentar a potência ou amplitude da onda.

3.4 Montagem final

A montagem final é esquematizada pela Fig. 8.

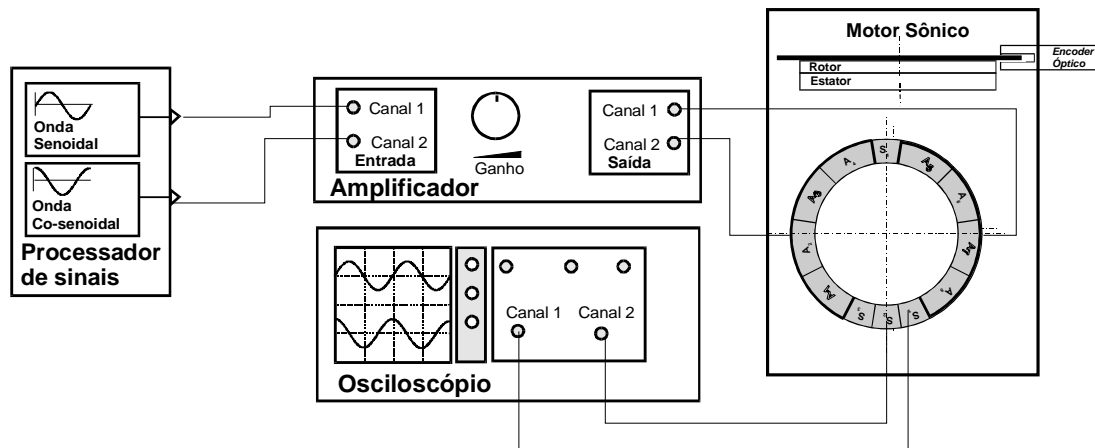


Figura 8 Montagem do protótipo de um motor sônico

4. RESULTADOS OBTIDOS

4.1 Freqüências naturais

Tabela 4 Freqüências naturais do motor

Livre livre	Sem rotor	Com rotor
Freqüência [Hz]	Freqüência [Hz]	Freqüência [Hz]
1811	----	1668
4940	4956	4866
4967	----	----
6679	6677	7974
9179	9149	----
10300	10220	10280
14330	14360	15100
17100	17000	17710

Através de uma varredura das freqüências no estator sob situações diferentes, estima-se a freqüência de trabalho real. A primeira situação é a livre-livre, o estator é sustentado verticalmente por um fio de *nylon*. A situação seguinte é com o estator apoiado horizontalmente por uma espuma, sem o rotor. Finalmente, o estator, apoiado pela espuma, está em contato com o rotor na face superior. A Tabela 4 apresenta as freqüências naturais experimentais obtidas nas 3 situações mencionadas.

4.2 Velocidade angular

A velocidade angular foi medida utilizando um *encoder* óptico e um contador de pulsos. A Tabela 5 apresenta alguns resultados obtidos para diferentes freqüências de excitação.

Tabela 5 Velocidades angulares do motor sem carga variando a frequência de excitação.

	Frequências de operação (kHz)								
	14,10	14,15	14,20	14,25	14,30	14,35	14,40	14,45	14,50
Velocidade (rad/s)	1,39	2,26	2,25	3,00	2,56	2,27	2,28	1,68	1,29

As medidas da velocidade de rotação variando a voltagem do sinal elétrico foram efetuadas utilizando a frequência de excitação 14,25 (kHz). Os resultados são apresentadas na Tabela 6.

Tabela 6 Velocidades angulares do motor variando a amplitude de voltagem

	Amplitude do sinal elétrico (V)								
	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0	6,5	7,0
Velocidade (rad/s)	1,32	1,26	1,49	1,51	1,81	1,76	2,07	2,23	2,34

4.3 Torque

O protótipo apresentado no presente trabalho foi montado para evidenciar os princípios de funcionamento do motor por ondas propagantes. Dessa forma, a montagem da bancada não previu a medida de torque. Para tanto, foi montado um segundo protótipo que se encontra em fase de instrumentação. Os resultados das medições de torque estarão disponíveis em breve.

5 CONCLUSÃO

A utilização de ondas propagantes para gerar força de acionamento é estudada neste trabalho. A excitação das ondas propagantes foi obtida experimentalmente num protótipo de um motor sônico. Neste protótipo, pode-se observar que existe uma variação das frequências naturais em função do tipo de solicitação do motor. O desempenho do motor depende da frequência de operação, como pode ser observado pela tabela 5. A faixa de frequência de melhor desempenho deste motor está entre 14200 [Hz] e 14300 [Hz], que corresponde a frequência natural do modo utilizado para gerar ondas propagantes através de duas ondas estacionárias. O desempenho também depende da amplitude de voltagem aplicada às cerâmicas piezoelétricas, como apresentado na tabela 6. As maiores voltagens correspondem as maiores deformações do estator, aumentando a velocidade do dente durante o contato mecânico e com isso a velocidade angular do motor.

Agradecimentos

Todas as pessoas que ajudaram na realização deste trabalho, em especial ao Paulo Zavalla pelo apoio na utilização do ANSYS®, ao Renato Machado pela desenho de fabricação do estator em 3D e ao José Luiz Correia Almeida pela confecção das peças, Marco Antônio de Oliveira Alves pela utilização da placa dSpace® para gerar os sinais elétricos e o Marco Antonio Arcos Camargo pela preparação do *encoder* óptico.

Também, ao apoio financeiro dado pelo CNPq - Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico.

REFERÊNCIAS

- Canon Inc., 1996, Lens Work, Toquio, pp. 179-83.
- DaimlerBenz, 1995, Travelling-wave motor- an electric drive system with a future (catálogo).
- Hagedorn, P., Wallaschek, J., 1993, Travelling wave ultrasonic motors, part I: working principle and mathematical modelling of the stator, Journal of sound and vibration, vol. 168, n. 1, pp. 115-122.
- Hagedorn, P., 1997, Mathematical Model for Piezoelectric Motors: An example of Mechatronic Modelling, Anais do XIV Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica, Bauru, Brasil.
- Hirata, H., Ueha, S., 1995, Design of a traveling wave type ultrasonic motor, IEEE Transactions on ultrasonic, ferroelectrics, and frequency control, March, vol. 42, n. 2, pp. 225-231.
- Maeno, T., Tsukimoto, T., Miyake A., 1992, Finite-Element analysis of the rotor/stator contact in a ring type ultrasonic motor, IEEE Transactions on ultrasonic, ferroelectrics, and frequency control, November, vol. 39, n. 6, pp. 668-674.
- Marto, A. G., 1997, Motores ultra-sônicos: princípios de funcionamento e características, Tese de mestrado, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, Brasil.
- Meirovitch, L., 1967, Analytical methods in vibrations, Macmilan, London, pp. 166-189.
- Ueha, S., et al, 1993, Ultrasonic motors: theory and applications, Claredon Press, Oxford, England.
- Wallaschek, J., 1995, Piezoelectric ultrasonic motors, Journal or intelligent material systems structures, January, vol. 6, pp.71-83.

Traveling Wave Motor

Abstract. *Recently, motors that use vibration to generate driving forces have been developed. The driving frequency is in general ultrasonic resulting in quiet operation to human ear. Thus, these motors are known as ultrasonic motors. The traveling wave motor is the most promising among the ultrasonic motors. This motor presents simple conception, is compact, produces high torque compared with its mass and operates at slow speed. Therefore development of remote drive systems using ultrasonic motors have been investigated intensely. Some commercial applications are already employed, as can be seen in auto-focus lens of photographic cameras. This work presents the basic operational principle of a traveling wave sonic motor, and describes the steps of conception, design, manufacturing and tests.*

Keywords: *ultrasonic motor, traveling wave, piezoelectricity*