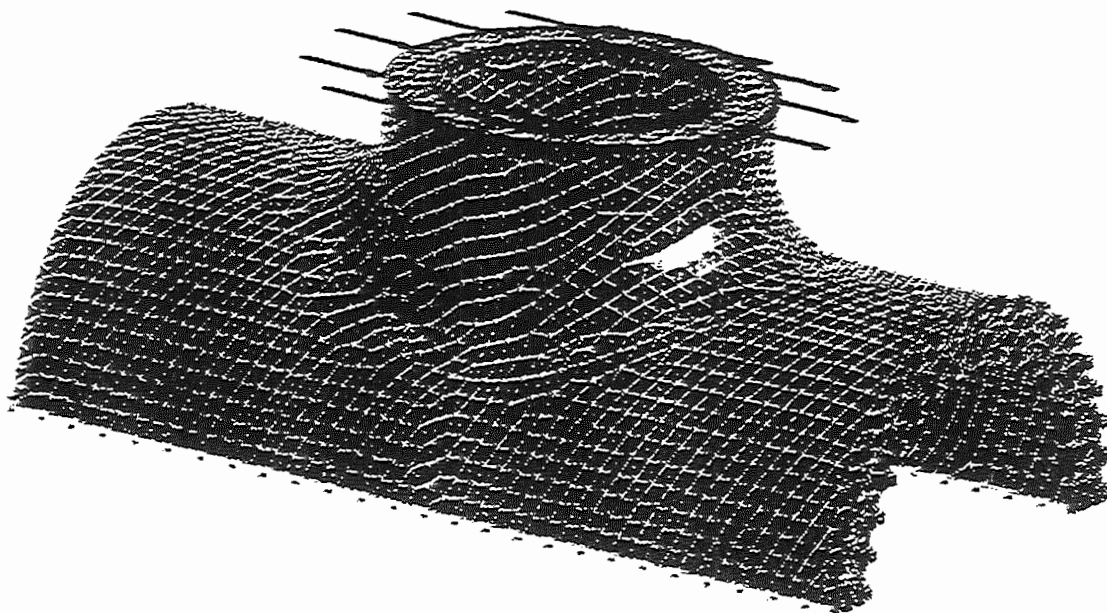


VII CONGRESO NACIONAL DE INGENIERIA MECANICA

2 al 5 de Octubre de 1996



Patrocina: Conicyt y Consejo de Rectores

UNIVERSIDAD AUSTRAL DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERIA
INSTITUTO DE MATERIALES Y PROCESOS TERMOMECANICOS
ESCUELA DE MECANICA

VALDIVIA

INDICE

CONFERENCIA PLENARIA

Gerges, Samir y Marcus Nunes: DIAGNOSTICO DOS DEFEITOS EM ROLAMENTOS POR MEDICOES DE VIBRAÇÕES

1

I. DISEÑO Y ANALISIS

Almeida, Carlos: ELASTO-PLASTICIDADE EM CASCAS FINAS AXISSIMETRICAS

9

Antillanca, Carlos y David Galleguillos: ANALISIS DE REACTOR MEDIANTE SISTEMA INTERACTIVO ALGOR

13

Antillanca, Carlos y Patricio Herrera: DISEÑO, MODELAMIENTO Y ANALISIS DE ESFUERZO DE UN BALDE PARA MAQUINA RETROESCAVADORA, MEDIANTE SISTEMA CAD/CAE

17

Aros, Jaime y Luciano Chiang: SOLUCION DE PROBLEMAS DE DINAMICA DE MECANISMOS POR MEDIO DE ALGEBRA SIMBOLICA

21

Barp, J.L., M.A. Luersen y C.A. Selke: PROBLEMAS DE CONTATO UNILATERAL EM PLACAS SEMI-ESPESSAS UTILIZANDO UMA TEORIA DE ORDEM SUPERIOR

25

Barrientos, Gabriel y Rubens Sampaio: INFLUENCIA DE LA FLEXIBILIDAD EN JUNTAS CON HUELGOS

29

Béjar, Marco A. y Roberto Saragoni: SISTEMA CAD/CAM PARA MÁQUINAS BORDADORAS JACQUARD

33

Boehn, Lourival y Luiz A. Consalter: GERENCIAMENTO DE DISPOSITIVOS DE FIXAÇÃO DE PEÇAS: AS VARIAS FACES DO PROBLEMA

37

Bollmann, Arno y Pedro L. Andrighetto: ANALISE DE UM POSICIONADOR ELETRO-HIDRAULICO COM VALVULA PROPORCIONAL

41

Bollmann, Arno y Eduardo A. Porteira: ANALISE TEORICO EXPERIMENTAL DE UM POSICIONADOR PNEUMATICO

45

Camelio, Jaime y Luciano Chiang: DESARROLLO DE UN BRAZO ROBOTICO DE 4 GRADOS DE LIBERTAD PARA EL TRANSPORTE DE PIEZAS METALICAS SUJETAS POR ELECTROIMAN

49

Campos, J., F.G. Santoro, J.D. Duduch, E. Morgado, G. De Paula y A.J. Vieira: ESTUDOS PRELIMINARES DE UM CONTROLADOR DIFUSO APLICADO EM SISTEMAS DE RASTREAMENTO LASER

53

Castillo, Juan y Alejandro Arancibia: UN PROGRAMA COMPUTACIONAL COMO AYUDA EN LA SELECCION DE VIGAS HIPERESTATICAS

57

Dias, Altamir y Cesar Vinadé: PROBLEMA DE ENCAIXE DE FIGURAS NAO CONVEXAS EM UM CONTORNO NAO CONVEXO

61

Dias, Altamir, Edson Santos y Raul Guenther: UMA INTERFACE INTERATIVA PARA A PROGRAMAÇÃO "OFF-LINE" DE MANIPULADORES

65

Donatelli, Gustavo D. y Carlos A. Schneider: METROLOGIA Y DISEÑO MECANICO: UNA DISCUSION SOBRE LOS ELEMENTOS DE LA INTERACCION

69

Boech, Lourival y Eduardo Rosar: O USOS: UM FATOR IMPORTANTE PARA O GERENCIAMENTO DE FERRAMENTAS DE CONFORMAÇÃO MECÂNICA	239
Boech, Lourival y Luciano Bui: DESENVOLVIMENTO E IMPLEMENTAÇÃO DE UM PROGRAMA APLICADO A METROLOGIA DE SUPERFÍCIE	243
Boech, Lourival, Jefferson de O. Gomes, Ricardo Peres, Durval J. De Barba, Eduardo Rosar e Irubanan Santos: ORGANIZAÇÃO DO CHÃO DE FÁBRICA PARA IMPLANTAÇÃO DO GERENCIAMENTO DE FERRAMENTAS DE USINAGEM	247
Boech, Lourival e Ismarco González: UMA ABORDAGEM DOS ASPECTOS TÉCNICOS, LOGÍSTICOS E ESTRATÉGICOS NO GERENCIAMENTO DE FERRAMENTAS	251
Cabezas, Carlos, Ernesto Zumeizu y Eduardo Quiroz: FUNCIONALIDAD POTENCIAL DE LA HOJALATA COLADA CONTINUA CON Y SIN RECUBRIMIENTO ORGÁNICO	255
Campos, Wanusa y Kazuo Hatakeyama: PLANEJAMENTO DA QUALIDADE NAS EMPRESAS MODERNAS PARA A PRODUTIVIDADE E COMPETITIVIDADE - UMA NECESSIDADE INADIÁVEL	259
Campos, J.C., Jaime G. Duduch y Arthur J. Vieira: ACCIONAMIENTO DIRETO DE FERRAMENTAS DE CORTE EM MÁQUINAS DE ULTRA-PRECISÃO	263
Canus, Manuel A. y Jorge Garín: DETERMINACIÓN DE AUSTENITA RETENIDA EN UN ACERO PARA TRABAJOS EN FRÍO POR DIFRACCIÓN DE RAYOS X	267
Canales, Daniel, Carlos Domínguez y Aquiles Sepúlveda: CALIBRACIÓN DE UNA MÁQUINA DE ENSAYOS UNIAXIALES (TRACCIÓN-COMPRESIÓN) DEL INSTITUTO DE INVESTIGACIONES Y CONTROL DEL EJÉRCITO, SEGÚN ESTÁNDARES INTERNACIONALES	271
Castillo, Ricardo: APLICACIÓN DE LA MECÁNICA DE LA FRACTURA AL ANÁLISIS DE FALLAS	275
Donatelli, Gustavo D. y Mark Golfan: COMPORTAMIENTO CLASIFICATORIO DE LOS SISTEMAS DE CONTROL DIMENSIONAL: PREDICCIÓN POR SIMULACIÓN	279
Donoso, J.R., O. Montecinos y F. Labbé: EVALUACIÓN NUMÉRICA DEL CENTRO DE ROTACIÓN EN UNA PROBETA FRACTOMECAÁNICA SENT CON METAL DE SOLDADURA	283
Donoso, J.R., T. Guzmán, R. Bernal y F. Labbé: EVALUACIÓN NUMÉRICA DE LA RELACIÓN DESPLAZAMIENTO DEL PUNTO DE CARGA-CMOD EN PROBETAS CILÍNDRICAS ENTALLADAS	287
Eigueta, Marcelo y Fidel Ulloa: MODELO NUMÉRICO PARA EL CÁLCULO DEL DAÑO MECÁNICO EN EL ESTAMPADO DE METALES	291
Furukawa, Eduardo, Pedro A. Nannetti, Paulo V. Prestes y Eduardo Viscome: BUSCA DE ROTAS DE PROCESSAMENTO QUE VIABILIZEM A OBTENÇÃO DE CONTATOS ELÉTRICOS Ag-30WC POR SINTERIZAÇÃO	295
Gatica, Damián y Johnny Opazo: EFECTOS DEL PRECALENTAMIENTO Y APOORTE TÉRMICO EN LA SOLDABILIDAD DE ACEROS DE ALTA RESISTENCIA	299
Godoy, Juan M., W. Weingaertner, J.C. López y Juan B. Giraudi: DETERMINACIÓN TEÓRICA DEL CAMBIO DE VOLUMEN POR UNIDAD DE TIEMPO EN EL TALADRADO POR FLUENCIA EN UNA PLANCHILLA DE COBRE	303
Godoy, Juan M., Segundo Tarque y Martín Quispe: ESTUDIO COMPARATIVO DE LOS ÁNGULOS DE CORTE UTILIZADOS EN EL MECANIZADO DE ALEACIONES DE COBRE-ZINC, TIPO DIN 17660 CUZN 30 EN UN TORNO CNC	307

ACIONAMENTO DIRETO DE FERRAMENTAS DE CORTE EM MÁQUINAS DE ULTRA-PRECISÃO

Eng. J.C. Campos Rubio, M.Sc., Prof. Jaime. G. Duduch, PhD e Prof. Dr. Arthur J. Viera Porto
Universidade de São Paulo - USP - Campus de São Carlos
Departamento de Engenharia Mecânica (SEM) - LAMAFE
13560-970 - São Carlos, SP - Brasil

RESUMO

No campo da Engenharia de Precisão o desempenho adequado das Máquinas-Ferramenta, passa necessariamente, pelas características dinâmicas dos sistemas de acionamento. A necessidade de usinar peças de formas complexas, com reduzidos erros dimensionais e de forma (da ordem de nanômetros), pequenas profundidades de corte, acabamento superficial satisfatório, entre outros, são dificilmente alcançados com servoacionamentos rotativos convencionais. Este trabalho corresponde a um estudo preliminar da utilização de acionamento direto de ferramentas de corte, através de atuadores lineares (servomotores translativos), onde são mostrados e discutidos os diversos tipos, servindo de base para o projeto de uma máquina-ferramenta de Ultra-precisão.

1. - INTRODUÇÃO

A competitividade na indústria moderna exige cada vez mais produtos de alta qualidade, com tolerâncias apertadas e formas complexas, o que se faz sentir em cada etapa do projeto destes. Desta forma, e como resposta ao grau de precisão dimensional e geometria exigida pelos produtos, as máquinas-ferramenta estão em permanente modificação. O sistema mais utilizado no acionamento de posicionadores nas máquinas operatrizes CNC é aquela constituída por um servomotor rotativo acoplado a um conjunto fuso/castanha de esferas (ver Fig. 1 (a)). Este tipo de arranjo apresenta algumas desvantagens próprias deste tipo de configuração, e.g.: presença de folgas, adicionar massas inerciais, não linearidades (histerese, atrito), menor velocidade crítica, etc.

Uma vez no campo da Engenharia de Precisão estas dificuldades acentuam-se, para tanto, são estudadas alternativas que possam reduzir significativamente ditos inconvenientes, a saber, motores lineares.

2. - SERVOMOTORES EM MÁQUINAS-FERRAMENTA

Funcionalmente o motor é o elemento que realiza uma conversão de sinais e sobretudo de energia entre o sistema elétrico e o mecânico, bem como do elétrico em térmico e em ruído.

Rapidez de movimento, repetibilidade, velocidades máximas elevadas e baixas constantes, facilidade de controle, confiabilidade e economia são objetivos que têm orientado o caminho do desenvolvimento das máquinas elétricas para aplicação em máquinas-ferramenta e robótica. Este conjunto de objetivos tem levado a diversas concepções não só dos motores elétricos como também dos sistemas de energização e seus sistemas de controle.

O aparecimento e evolução dos servomotores coincidem com a constante busca de alto desempenho e conseqüente eliminação dos fatores limitantes deste.

O servomotor distingue-se do "motor comum" pelo fato destes últimos serem otimizados em função do mínimo custo, longa vida útil, etc., enquanto que os servomotores são otimizados em função de seu desempenho estático mas principalmente de sua dinâmica. Dentro deste contexto, e considerando o tipo de movimento mecânico realizado pode-se distinguir dois tipos de servomotores: rotação e translação. Servomotores Translativos serão visto no item seguinte. Um grupo especial de atuadores translativos, serão analisados detalhadamente no item 4.

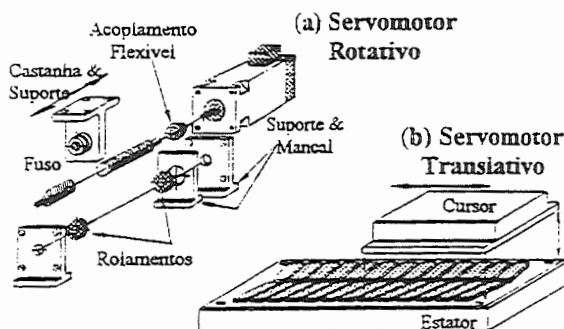


Fig. 1 - Componentes básicos de um sistema posicionador: Servomotores Rotativos (a) e Translativos (b)

3. - SERVOMOTORES LINEARES OU TRANSLATIVOS

Como pode ser observado na Fig. 1, ao contrário dos servomotores rotativos, os motores lineares eliminam acoplamentos e conversores de movimento permitindo deslocamentos de translação isentos de erros provenientes de folgas devido a acoplamentos, engrenagens e correias, além de histereses do fuso e das cadeias de transmissão.

Uma diferença importante entre os motores Rotativos e os Lineares é que os primeiros produzem uma força resultante tangencial ao torque de saída, enquanto que os motores lineares o "torque" tem a direção da força resultante.

PALAVRA-CHAVE:

- ULTRA PRECISÃO
- USINAGEM
- ACIONAMENTO

Servomotores de Passo Lineares. Concebidos a partir do motor de passo rotativo, sendo o seu cursor (rotor no motor rotativo) um corpo plano que contém ímãs permanentes, e seu estator de material ferromagnético semelhante ao do motor de passo rotativo, porém de forma plana, fecha o circuito magnético. Os motores de passo lineares convertem energia elétrica controlada por sinais digitais de comando, em movimentos de transição discretos, com passo completo assumindo valores em torno de $5 \mu\text{m}$, e com uma força máxima de deslocamento superior a 4000 N.

Da mesma forma que o motor de passo rotativo, o motor de passo linear é capaz de posicionar cargas sem necessidade de re-alimentação. Porém, para posicionamentos sub-micrométricos, por apresentar variação (picos de intensidade) da força de transição (*cogging*) é aconselhável controlá-lo por meio de sensores de posição, tais como escalas optoeletrônicas ou LASER interferométrico. Assim, empregando-se motores controlados eletronicamente (linear microstepping motors) em posicionadores, é possível atingir resoluções inferiores a $0,1 \mu\text{m}$ (Lammers, 1994).

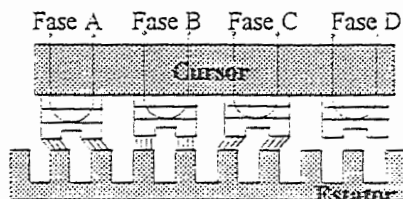


Fig. 2. - Motor de passo linear

Motores Lineares Sem Escovas. Os servomotores de CC Brushless ou "sem escovas" funcionam de maneira semelhante ao seu análogo rotativo, são constituídos basicamente de um cursor portando ímãs permanentes e um estator eletromagnético (enrolamentos no estator) sendo a comutação das bobinas realizada eletronicamente, o campo eletromagnético gerado interage com o campo magnético dos ímãs permanentes do cursor, resultando em uma força de translação proporcional à intensidade de corrente.

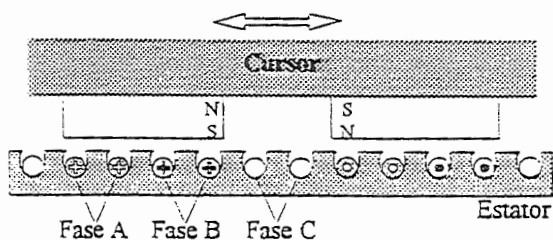


Fig. 3 - Motor CC Linear tipo Brushless

Existem basicamente dois tipos de Servomotores Lineares Sem Escovas: com cursor ferromagnético, e com cursor não magnético (alumínio, epoxi). Os motores com cursor de material ferromagnético caracterizam-se por possuírem alta densidade de fluxo magnético e consequentemente uma maior força resultante, porém são pesados e voúmosos com variações na força de até 5% do valor médio resultante. Além disso, devido ao fato do cursor ser ferromagnético, surge

uma componente normal ao movimento da carga que, quando muito excessiva, pode causar erros.

Por outro lado, nos motores com cursor não magnético tanto a componente normal quanto os picos ou variações de força (*cogging*) são nulos, devido a isto podem ser considerados mais adequados tanto para regimes de alta quanto de baixas velocidades.

Motores Lineares Tipo Bobina Móvel. Um dos tipos mais simples de atuadores lineares eletromagnéticos são os denominados solenóides, estes atuadores se utilizam de um campo magnético, gerado pela passagem de corrente elétrica através das espiras de uma bobina, para atrair um elemento metálico na direção da espira. Devido à não-linearidade da força de resposta, consequência da relação entre as várias variáveis envolvidas, e a sua baixa constante de tempo eletro-mecânica, este tipo de atuador é muito utilizado na fixação de componentes mecânicos (at. passivo).

Por outra parte, atuadores que combinam campo magnético bobinado com ímãs permanentes, são frequentemente denominados de atuadores bobina móvel ou Voice Coil.

Motores Lineares tipo Voice Coil. Este tipo de motor linear se utiliza do mesmo princípio usado nos Alto-falantes, daí seu nome, Voice Coil, utilizando Ímãs Permanentes para estabelecer um circuito magnético que interage com o campo magnético gerado pela passagem de corrente elétrica através de um conjunto de espiras (Bobina) dispostas sobre um cursor móvel; desta forma um valor mínimo de corrente aplicado sobre a bobina provoca o aparecimento de uma força sobre a mesma. Assim, os ímãs permanentes atuam como um tipo de "pre-cargas" do atuador translativo, o que aumenta-se a rapidez de resposta (Largura de Banda) e lineariza sua resposta força-deslocamento.

Em aplicações com faixa limitada de movimentos, os atuadores tipo Voice Coil são largamente superiores à maioria dos outros atuadores, devido a terem histerese mecânica nula (embora tenham histerese magnética a qual afeta o projeto do sistema de controle), ripple de torque (ou força) nulo e sem folgas. Assim, é possível alcançar resoluções nanométricas, em faixas de deslocamento de alguns milímetros.

Alguns pesquisadores já se aventuraram na utilização direta deste tipo de motor no acionamento de ferramentas de corte em tornos de precisão para usi-

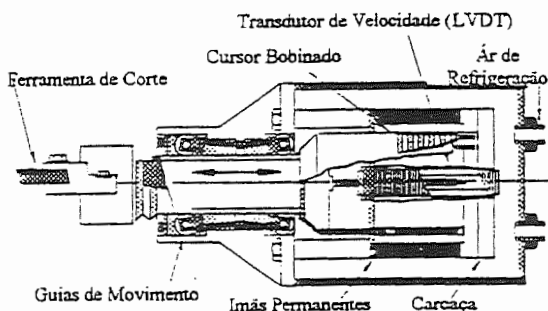


Fig. 4 - Motor Linear tipo Voice Coil

nagem de peças de seção transversal não-circular (c.g. pistões, cames, etc), com resultados alentadores (Wang, 1992), um exemplo é mostrado na Fig. 6.

Sua principal desvantagem é, como no motor rotativo CC comum, que pode gerar considerável calor, transmitindo-o à estrutura da máquina-ferramenta. Portanto, se possível atuadores Piezoelétricos ou Magnetoestrutivos deviam ser usados. (Slocum, 1992).

4 - ATUADORES LINEARES

Como mostrado anteriormente, o tipo mais simples de atuador é o solenóide, este tipo de atuador embora não seja apropriado para utilizações em posicionamento em mecânica de precisão, seu princípio de funcionamento serve para introduzir mais facilmente no *Design* de motores lineares de bobina móvel. Outros tipos de atuadores lineares poderiam ser caracterizados neste trabalho (e.g. hidráulicos, pneumáticos, etc), porém pouco ou quase nada somariam as soluções procuradas para o problema de posicionamento sub-micrométrico de elevada rapidez e repetibilidade.

A seguir, atuadores baseados nos princípios piezoelétricos e magnetoestrutivos serão apresentados.

Atuadores Piezoelétricos. Os atuadores piezoelétricos são baseados na propriedade que certos materiais cristalinos possuem de induzir uma carga elétrica proporcional à mecânica aplicada. Neste estudo, os elementos cerâmicos são utilizados de maneira inversa a este feito, isto é, uma mudança geométrica do contorno externo do material é provocada devido à aplicação de uma tensão elétrica. A deformação do elemento (expansão piezoelétrica) é muito utilizada na movimentação e posicionamento de sistemas mecânicos, esta deformação é alcançada pela aplicação dos efeitos longitudinais ou transversais (Weck, 1991).

Como características vantajosas de um atuador piezoelétrico pode-se afirmar que: podem alcançar resoluções nanométricas de posicionamento, não possui folgas nem partes móveis, têm alta eficiência na conversão de energia e capacidade de carga (até 30000 N), bem como ampla largura de banda, etc.

Faz-se necessário citar que os atuadores piezoelétricos não são adequados para suportar cargas fora de centro e esforços de tração, e muitos vem equipados com molas internas de pré-carga.

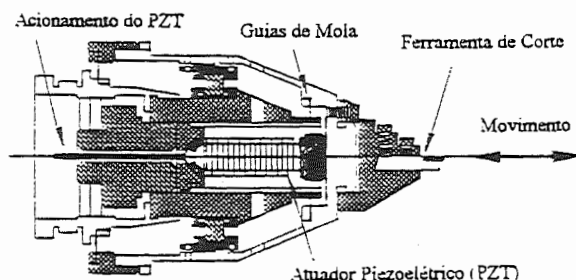


Fig. 5 - Utilização de um Atuador Piezoelétrico

Por outro lado, tensões aplicadas muito altas devem ser evitadas, se uma tensão reversa (provoca contração) superior a 20% do valor da nominal for aplicada o piezoelétrico despolariza irreversivelmente, além do que tensões muito altas criam canais de condução elétrica na cerâmica, curto-circuitando-a, diminuindo a sua resistência e prejudicando a sua expansão, ver Phisik Instrumente, (1992).

Um exemplo prático de utilização de Atuadores piezoelétricos em Mecânica de Ultra-Precisão é mostrado na Fig. 5, onde um porta-ferramenta é acionado diretamente por destes atuadores (Slocum, 1992).

Motores Ultra-sônicos. Um dos mais recentes desenvolvimentos na área de motores/atuadores translativos para aplicações em Mecânica de Precisão, são os denominados Motores Ultra-sônicos (USM - Ultrasonic Motors) (Izuno et al, 1992). Um USM consiste basicamente de elemento móvel (cursor ou rotor) situado sobre um conjunto de elementos piezo-cerâmicos, divididos em várias fases elétricas e unidos através de um componente elástico. Os elementos piezo-cerâmicos vibram em altíssima frequência (ultra-sônica) provocando que o componente elástico entre em ressonância com sua frequência natural, o movimento em sentido contrário é alcançado pela defasagem (sinal de fase) criada entre a oscilação imposta aos piezoelétricos e a resposta obtida na vibração ressonante auto-excitada do elemento que transporta o cursor no sentido contrário. Tanto motores translativos como rotativos baseados neste princípio podem ser construídos, fornecendo movimentos rápidos, baixo erro de posicionamento e alta repetibilidade (Machine Design, 1995).

Atualmente é possível encontrar versões comerciais deste novo motor, como o oferecido pela Anorad Corp. (N.Y. - USA), um posicionador linear de um único eixo capaz de movimentar aproximadamente 3 kgf a uma velocidade de 0.2 m/s, fornecendo uma resolução inferior a 5 nm. Movimentando em ambos sentidos, podendo ser comandado em malha aberta ou controlado em malha fechada.

Uma desvantagem que pesa na hora de optar pela utilização de USM é que, atualmente, este possui uma vida útil reduzida se comparado com outro tipo de acionamento, devido principalmente aos esforços mecânicos atuantes nas partes cerâmicas.

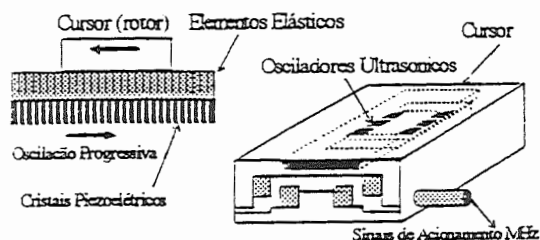


Fig. 10 - Esquema básico do Motor Ultra-sônico

Atuadores Magnetoestrutivos. Materiais magnetoestrutivos atuam de forma a transformar energia elétrica de baixa tensão numa ação mecânica, ou quando usados como sensor, convertendo uma defor-