

MODELAGEM DE TRANSDUTORES PIEZOELETRICOS DE POTÊNCIA

Julio C. Adamowski, Marcelo Y. Matuda, Flávio Baiocchi, Celso M. Furukawa
Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (PMc)
Av. Prof. Mello Moraes, 2231 CEP 05508-900 São Paulo - SP
e-mail: jcadamow@usp.br

Abstract

This paper presents two methods for modeling sandwich type power piezoelectric transducers. This transducer is composed of a stack of piezoelectric ceramics terminated at the two extremities with steel end masses. The piezoelectric ceramics are actually rings connected by a bolt that passes through the hole of the rings and is clamped at both ends. This bolt applies tension to the stack. This planar multi-layered transducer may be solved by a very efficient analytical method called Chain Matrix. In this method, electric and acoustic matrices describe the interactions between successive layers, and chaining these matrices provides a model of the complete transducer. Another method for modeling the transducer is based on the finite element method using the ANSYSTM software. Both methods allow to calculate the electrical impedance of the transducer. The resonant and antiresonant frequencies are determined from the electrical impedance. Then, to achieve different criteria of optimization, the parameters of the transducers may be changed and the results rapidly examined. These methods were applied to design and construct a prototype of the transducer. Experimental and simulated results show good agreement. In conclusion these modeling methods are accurate, constituting a useful tool for designing power transducers.

Keywords

Chain matrix, finite element method, power transducer, ultrasound, piezoelectric transducer.

1. INTRODUÇÃO

Transdutores piezoelétricos de potência têm sido usados nas mais diversas aplicações (Gallego, 1989), tais como: limpeza de peças, soldagem de plásticos e metais, aglomeração de partículas, nebulização de líquidos, sonares, transmissão acústica de dados, etc. O estudo de transdutores piezoelétricos de potência, no Departamento de Engenharia Mecânica da EPUSP, iniciou-se com a necessidade de implementação de sistemas de transmissão acústica de dados em colunas de produção de petróleo, visando a eliminação de cabos elétricos. A transmissão acústica de dados tem sido utilizada em água e existem estudos para sua aplicação em colunas de perfuração de poços de petróleo (Drumheller, 1989, 1995), para a telemetria de dados provenientes de sensores de inclinação instalados próximo à extremidade da broca de perfuração.

Os maiores problemas deste tipo de sistema de transmissão de dados estão relacionados basicamente com as perdas na linha de transmissão, com as limitações do transdutor acústico no que diz respeito à potência e à temperatura de operação, com as baterias de armazenagem

de energia elétrica, e com a confinabilidade geral do sistema. O transdutor deve ter uma alta eficiência e um bom acoplamento com a coluna de aço para minimizar o consumo de energia e otimizar o sinal transmitido.

Um transdutor de potência para ondas longitudinais é geralmente piezoelétrico do tipo sanduiche (Gallego, 1989), constituído por um conjunto de cerâmicas piezoelétricas empilhadas e montadas na forma de um sanduiche e eletricamente em paralelo. Tem na retaguarda um material metálico com comprimento suficiente para completar 1/4 de comprimento de onda, sendo que ao seu final tem ar que atua como um bom refletor. Na frente, o material deve permitir um bom casamento de impedâncias entre o transdutor e o meio em que a onda se propagará. O modelo do transdutor acoplado à carga torna-se complexo se a geometria envolvida não permitir tratar matematicamente o problema de forma unidimensional.

Um transdutor de potência deve ser otimizado com relação ao coeficiente de acoplamento eletrônico. As perdas no transdutor e no acoplamento com a linha de transmissão também devem ser minimizadas. Um bom casamento de impedâncias entre o transdutor e o meio produz uma diminuição no fator de qualidade do transdutor, fazendo que este tenha uma banda mais larga do que se estivesse com as duas extremidades no ar, pois a onda acústica que se propaga para a frente somente será refletida se encontrar variações na impedância acústica. Nesse caso, o baixo fator de qualidade do transdutor não implica que as perdas são elevadas, mas sim que a transferência de energia acústica é perfeita devido ao bom casamento de impedâncias acústicas.

Para atingir a potência desejada, o sanduiche deve ser pré-tensionado utilizando-se um parafluso de aço de elevada resistência mecânica. O valor da pré-tensão deve chegar a 25 MPa (Gallego, 1989). Deve-se tomar o cuidado de garantir um contato mecânico perfeito nas interfaces do sanduiche, pois isso evita grandes variações de impedância provocadas pelo ar. Os tipos de cerâmicas piezoelétricas mais apropriadas são o PZT-4 e o PZT-8, pois apresentam características para emitir potências elevadas, têm um elevado fator de qualidade mecânico, e baixas perdas dielétricas. O grande problema com a utilização de cerâmicas piezoelétricas é a depolarização ao longo do tempo que é acelerada em temperaturas elevadas. Nesse caso, pode-se considerar a utilização de um transdutor magnetostrictivo com o material cerâmico Terfenol-D.

Em projetos de transdutores de potência, há a preocupação com fatores como eficiência de emissão e recepção, determinação das frequências de ressonância, valor da impedância nas frequências de ressonância, durabilidade e estabilidade do transdutor, nível de potência na saída, etc. Para otimizar essas características, podem ser utilizados métodos analíticos e/ou numéricos, variando-se os parâmetros do transdutor para que se estude o seu comportamento, de maneira rápida e precisa. Um método analítico utilizado, denominado *chazin matrix* (Kraszewski *et al.*, 1991), é um método rápido que produz bons resultados em muitos casos. As dificuldades nesse método começam quando a geometria ou as condições de contorno e carregamento do transdutor se tornam complicadas. Como método numérico, tem-se o método dos elementos finitos (MEF) que pode ser usado na solução de problemas mais complexos (Bathe, 1982), podendo o transdutor ser considerado uni, bi ou tridimensional.

Neste artigo são apresentados dois tipos de modelagem de transdutores piezoelétricos de potência: MEF e *chazin matrix*. Para a verificação dos modelos, foi construído um transdutor sanduiche simétrico pré-tensionado, com quatro cerâmicas anulares de PZT-8 e duas massas de aço. Essa configuração de transdutor tem comportamento bem conhecido e é adequada para verificar os modelos.

2. MODELAGEM PELO MEF

A modelagem do transdutor piezoelétrico pelo MEF pode ser tratada como um problema bidimensional, com a utilização de elementos axisimétricos. Para simular a carga, foi utilizado um elemento finito, acoplado à face frontal do transdutor. Esse elemento permite introduzir condições de contorno relacionadas à absorção da onda acústica. Absorção total significa que toda a energia incidente é absorvida ao final da camada de fluido. Um outro artifício utilizado refere-se ao valor da impedância acústica do fluido. Essa pode ser considerada igual à impedância acústica da parte frontal do transdutor, permitindo a transmissão total da onda acústica, ou tendo valores intermediários que representariam reflexões na interface.

Os transdutores piezoelétricos utilizados neste trabalho envolvem basicamente três tipos de materiais: metais, cerâmicas piezoelétricas e fluidos. As equações que modelam os materiais piezoelétricos são:

$$div(T) = \rho \cdot \ddot{u} \quad (2^a \text{ Lei de Newton}) \quad (1)$$

$$T = e^T \cdot S - e \cdot E \quad \text{(Equações constitutivas)} \quad (2)$$

$$D = e \cdot S + \epsilon \cdot E \quad (3)$$

onde T é o tensor de tensões, \ddot{u} a aceleração da partícula, D o vetor deslocamento elétrico, E o vetor campo elétrico, S o tensor de deformações, e o tensor de coeficientes piezoelétricos, e^T o tensor de constantes dielétricas para deformação constante e e o tensor de coeficientes de rigidez para campo elétrico constante. Com os coeficientes piezoelétricos e as constantes dielétricas nulos, essas equações servem para representar também os metais. Os fluidos podem ser representados pelas equações:

$$\nabla^2 p = \frac{1}{c} \cdot \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} \quad \text{(Equação de onda)} \quad (3)$$

$$n \cdot \nabla p + \rho_0 n \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = 0 \quad \text{(Interface fluido-estrutura)} \quad (4)$$

$$n \cdot \nabla p + \beta \frac{1}{c} \frac{\partial p}{\partial t} = 0 \quad \text{(Absorção acústica)} \quad (5)$$

onde p é a pressão acústica, c velocidade do som no fluido, n o versor normal à interface, u o vetor deslocamento, ρ_0 densidade de repouso do fluido, e $\beta = \rho_0 c / Z$, sendo Z a impedância acústica do material de amortecimento na interface.

A equação (3) modela a propagação de ondas no interior do fluido. A equação (4) fornece a condição de contorno na interface fluido-estrutura e é obtida através da condição de continuidade na interface e do equilíbrio de forças na mesma interface. A equação (5) permite a simulação de um material externo ao fluido, apresentando uma impedância acústica de valor fixo. Dentro de certas condições, consegue-se definir um valor de Z para o qual a onda acústica não sofre reflexão na interface (simulação de fluido "infinito").

Utilizando-se as equações acima, no MEF o sistema de equações para um elemento piezoelétrico isolado, não considerando perdas internas, fica na forma:

$$\begin{pmatrix} M_{uu} & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{u} \\ \ddot{\phi} \end{Bmatrix} + \begin{pmatrix} K_{uu} & K_{u\phi} \\ K'_{u\phi} & -K_{\phi\phi} \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} u \\ \phi \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F \\ Q \end{Bmatrix} \quad (6)$$

onde K_{uu} , K_{uv} , K_{vu} , M_{uu} são respectivamente as matrizes de rigidez mecânica, acoplamento piezoelétrico, rigidez dielétrica e massa, e U , F , Q e ϕ são respectivamente os vetores deslocamento, força externa, carga elétrica e potencial elétrico (Silva & Adamowski, 1992). Para um elemento metálico, o sistema se simplifica para:

$$M \cdot \ddot{U} + K \cdot U = F \tag{7}$$

O ANSYSTM permite incluir uma matriz de amortecimento, pela fórmula:

$$M \cdot \ddot{U} + (\alpha_D \cdot M + \beta_D \cdot K) \cdot \dot{U} + K \cdot U = F \tag{8}$$

onde α_D e β_D são, respectivamente, os parâmetros ALPHAD e BETAD utilizados pelo ANSYSTM. Para um elemento fluido com interface fluido estrutura, tem-se:

$$\begin{pmatrix} M_{uu} & 0 \\ \rho_0 R^t & M^p \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{U} \\ \dot{P} \end{Bmatrix} + \begin{pmatrix} C_{uu} & 0 \\ 0 & C^p \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{U} \\ \dot{P} \end{Bmatrix} + \begin{pmatrix} K_{uu} & -R \\ 0 & -K^p \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} U \\ P \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F \\ 0 \end{Bmatrix} \tag{9}$$

onde $\rho_0 R^t$ é a matriz de massa do acoplamento fluido-estrutura, M^p a matriz de massa acústica, C_{uu} a matriz de amortecimento estrutural, C^p a matriz de amortecimento acústico, R a matriz de rigidez do acoplamento fluido-estrutura e K^p matriz do coeficiente de pressão (ANSYS, 1994).

3. MODELAGEM PELO CHAIN MATRIX

Introduzindo-se hipóteses simplificadoras, o transdutor pode ser analisado unidimensionalmente. Assim, pode-se utilizar a formulação *chain matrix* (Kraszewski, 1991), em sua modelagem. A solução analítica parte da hipótese de que o transdutor vibra em uma única direção, conhecido como modo de espessura. Todas as quantidades físicas (velocidade, força, campo elétrico, etc.) que definem o transdutor têm componentes somente nessa direção.

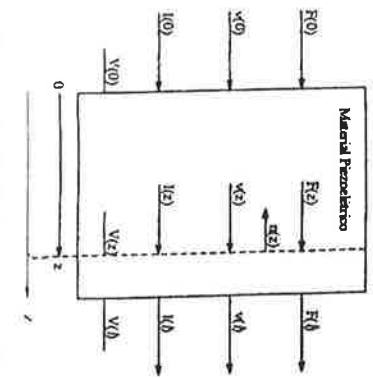


Figura 1 - Variáveis de entrada e saída representadas como funções em 0 e l .

Considerando um material piezoelétrico constituído de uma única camada (Figura 1), vibrando na direção z , tem-se uma matriz de ordem quatro que estabelece a relação entre dois vetores. Cada um desses vetores é definido numa seção transversal do material através de dois parâmetros acústicos e dois elétricos. Para uma posição genérica z , esses parâmetros são definidos pelas seguintes funções: $F(z)$ a força agindo na superfície plana, $v'(z)$ a velocidade das partículas, $I(z)$ a corrente elétrica no sentido da esquerda para direita e $V(z)$ o potencial elétrico. Assume-se que todos os parâmetros são funções fasoriais apenas de z , porque a dependência no tempo é harmônica.

Os elementos do *chain matrix* foram deduzidos a partir das equações (1) e (2), da relação de formação-deslocamento e da Lei de Gauss. A equação matricial que estabelece a relação entre a força, a velocidade de partícula, o potencial elétrico e a corrente elétrica do plano transversal em z com os parâmetros do plano de referência em 0 é:

$$\begin{Bmatrix} F(z) \\ v'(z) \\ V(z) \\ I(z) \end{Bmatrix} = \begin{pmatrix} \cos(kz) & -jZ \sin(kz) & 0 & -j\beta(1 - \cos(kz)) \\ -j \sin(kz) / Z & \cos(kz) & 0 & \beta \sin(kz) / Z \\ -\beta \sin(kz) / Z & j\beta(1 - \cos(kz)) & 1 & -\left(\frac{1}{j\omega C_0} + \frac{j\beta^t \sin(kz)}{Z}\right) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \times \begin{Bmatrix} F(0) \\ v'(0) \\ V(0) \\ I(0) \end{Bmatrix} \tag{10}$$

onde k é o número de onda, ω a frequência angular de excitação e $Z = A\rho c$ a impedância acústica característica do meio resultante do produto entre a área A transversal do transdutor, a densidade ρ do meio e a velocidade de propagação c . As constantes C_0 e β são definidas como $C_0 = \epsilon^s A / \lambda$ e $\beta = c / \omega \epsilon^s$, onde ϵ^s é o coeficiente piezoelétrico, ϵ^s a constante dielétrica para deformação constante e λ a espessura do material piezoelétrico.

Para simular um transdutor multi-camadas, pode-se considerar a saída de uma camada como a entrada de outra camada adjacente. Essas camadas podem ser constituídas de materiais diferentes, piezoelétricos e não-piezoelétricos. Para se determinar a relação entre os parâmetros das interfaces externas de um conjunto de camadas, basta multiplicar as matrizes em cascata. Montado o sistema de equações, que definem o transdutor, calcula-se a impedância elétrica do transdutor e determinam-se as frequências de ressonância e anti-ressonância.

A formulação do *chain matrix* permite considerar as perdas dielétricas e mecânicas no transdutor e também o acoplamento do transdutor a um meio externo, sólido ou líquido. Esse acoplamento é feito através da definição de impedância acústica característica do meio externo. Por exemplo, no diagrama mostrado na Figura 1, as faces do transdutor piezoelétrico podem ser carregadas através das impedâncias acústicas características Z_0 e Z_l . Essas impedâncias definem as seguintes relações entre força e velocidade da partícula em suas respectivas faces: $F(0) = -Z_0 v'(0)$ e $F(l) = Z_l v'(l)$.

4. SIMULAÇÃO E VERIFICAÇÃO EXPERIMENTAL

O transdutor modelado é do tipo sanduíche simétrico, com quatro cerâmicas anulares de PZT-8, massas de aço 1020, e parafuso de pré-tensão em aço de alta resistência mecânica, cujo

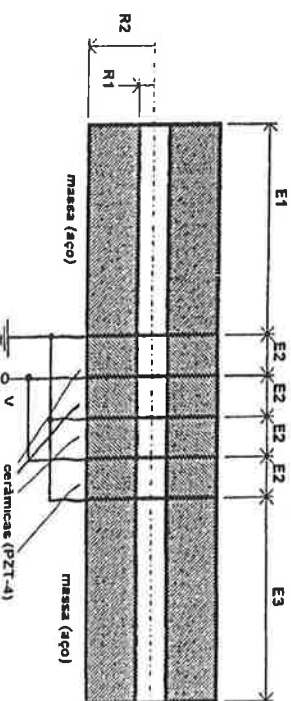


Figura 2 - Transdutor sanduíche (parafuso de pré-tensão não mostrado).

desenho esquemático é mostrado na figura 1. As massas de aço têm comprimentos iguais (E1=E3), de 70 mm. As cerâmicas têm diâmetro (2xR2) de 27,3 mm, espessura (E2) de 9,95 mm, e um furo axial com diâmetro (2xR1) de 7,3 mm. Elas estão polarizadas na direção axial, e montadas eletricamente em paralelo, isto é, com sentidos de polarização alternados. O parafuso de pré-tensão serve para proporcionar um bom contato entre os vários componentes, e para manter as tensões em cada ponto das cerâmicas abaixo do limite de resistência à fadiga em tração. Essa configuração de transdutor tem comportamento bem conhecido e é adequada para verificar os modelos baseados no MEF e no *chain matrix*.

O transdutor simétrico foi modelado com o MEF no ANSYS™ e com o *chain-matrix* no Matlab™. No ANSYS™ foi utilizado o elemento PLANE13 para as cerâmicas, no modo axisimétrico. Este é um elemento de área, com quatro nós e interpolação linear. Os graus de liberdade ativados são tensão, deslocamento em x e em y (radial e longitudinal). Para o aço foi utilizado o elemento PLANE42, no modo axisimétrico. Esse elemento, de área, possui quatro nós e interpolação linear, com graus de liberdade de deslocamento em x e y. O elemento FLUID29, também de área e no modo axisimétrico, com interpolação linear e quatro nós, com graus de liberdade de deslocamento em x e y, e pressão, serviu para aplicar uma impedância acústica às extremidades do transdutor, que tem as duas faces imersas em água. A camada externa do fluido foi configurada de modo que o fluido se comportasse como se fosse "infinito". Através de uma análise harmônica, obteve-se a curva de resposta em frequência da impedância elétrica desse transdutor. A curva do módulo da impedância é mostrada na figura 3 (linha tracejada). Nessa simulação a ressonância ocorre em 10,9 kHz e a anti-ressonância em 12,7 kHz.

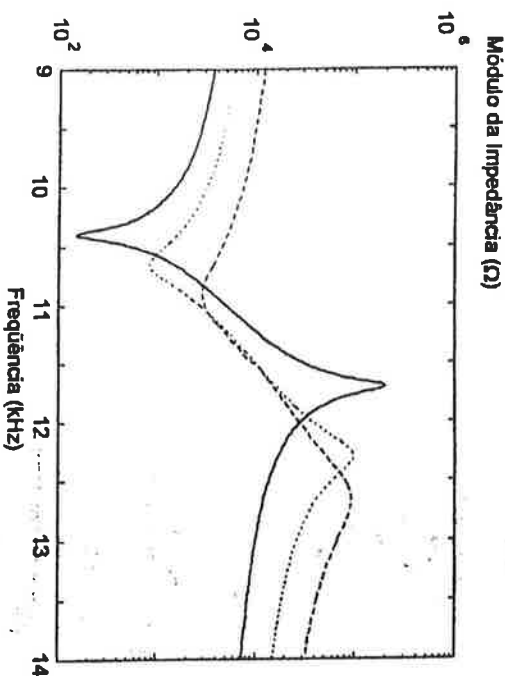


Figura 3 - Módulo da impedância em função da frequência. Resultado experimental (linha contínua). Resultados simulados: MEF (linha tracejada) e *chain matrix* (linha pontilhada).

O modelo unidimensional pelo método *chain matrix*, implementado no Matlab™, foi utilizado para modelar o mesmo transdutor, com apenas uma das extremidades imersa em água. Nesse modelo, foram introduzidas aproximações relacionadas à relação entre o diâmetro do transdutor e os comprimentos de onda envolvidos. Quando essa relação é muito pequena, o

comportamento vibracional do transdutor deve ser tratado como no modo de barra, isto é, as tensões fora da direção axial são consideradas nulas, e as deformações ficam em função da deformação na direção axial. Quando essa relação é grande, o transdutor vibra no modo de espessura, isto é, as deformações nas direções fora da direção axial são consideradas nulas, e as tensões ficam em função da tensão na direção axial. Na prática, para a mudança entre estes dois tipos de modelagem, basta a mudança de alguns parâmetros, tais como: velocidade de propagação e constante piezoelétrica. A curva do módulo da impedância, obtida por esse modelo, é mostrada na figura 3 (linha pontilhada). Nessa simulação a ressonância ocorre em 10,7 kHz e a anti-ressonância em 12,3 kHz.

Um protótipo do transdutor, construído a partir dos resultados das simulações, foi verificado experimentalmente, com uma de suas extremidades imersa em água. Sua impedância elétrica foi medida com um impedímetro fasorial, HP 4194A. O módulo da impedância em função da frequência é mostrado na figura 3 (linha contínua). A ressonância ocorre em 10,4 kHz e anti-ressonância ocorre em 11,7 kHz.

5. COMENTÁRIOS E CONCLUSÕES

Na frequência de ressonância do transdutor utilizado, os parâmetros do modo de barra proporcionaram resultados mais próximos aos resultados obtidos pelo modelo bidimensional (axisimétrico) utilizando o MEF (ANSYS™) do que quando foram utilizados os parâmetros do modo de espessura. No modo de espessura as frequências resultaram maiores (maior rigidez), enquanto que no modo de barra as frequências resultaram menores, em comparação com o MEF. Esses resultados confirmam que o modo de barra representa melhor um transdutor quando o comprimento de onda é muito maior que o seu diâmetro.

A colocação de água na extremidade do transdutor faz com que a impedância na ressonância aumente e na anti-ressonância diminua. As frequências de ressonância e de anti-ressonância praticamente não se alteram. As propriedades dos materiais, principalmente das cerâmicas piezoelétricas, apresentam variações de um fabricante para outro. Essas variações são da ordem de ±5%, o que produz uma variação nos resultados simulados da ordem de ±3%.

Os resultados das simulações pelo MEF apresentam variação de 4,8% para a frequência de ressonância e 8,5% para a frequência de anti-ressonância, em relação aos resultados experimentais. O modelo é mais rígido que o transdutor, pois no modelo as cerâmicas estão presas umas às outras e às massas de aço. Isto é, na interface entre duas cerâmicas, todos os pontos da face de uma das cerâmicas são comuns à face da outra. No transdutor real, o pré-tensionamento e o coeficiente de atrito entre as faces da cerâmica não conseguem impedir por completo o movimento relativo nas interfaces.

Os resultados das simulações pelo *chain matrix* apresentam variação de 2,9% para a frequência de ressonância e de 5,1% para a frequência de anti-ressonância, em relação aos resultados experimentais. As variações são menores que os resultados fornecidos pelo MEF, porém foi considerado que o transdutor vibra no modo de barra. À medida que a relação entre o diâmetro do transdutor e o comprimento de onda vai diminuindo, passa a predominar o modo de espessura, que torna o transdutor mais rígido. Para uma determinada faixa de valores dessa relação, nem o modo de barra e nem o modo de espessura fornecerão um resultado compatível com a realidade. Já o modelo que utiliza o MEF, é tridimensional e não apresenta esse problema. Ele pode ser aplicado em qualquer situação, porém requer um grande esforço computacional em relação ao *chain matrix*.

De um modo geral, os dois modelos forneceram resultados satisfatórios para o projeto de transdutores piezoelétricos de potência.

6. AGRADECIMENTOS

À FAPESP e à FINEP que financiaram os equipamentos e materiais utilizados neste trabalho, e a vinda do professor Rubens A. Siegelmann da Universidade de Washington. Ao CNPq pela bolsa de mestrado do aluno Marcelo Y. Matuda. Em particular, ao professor Rubens A. Siegelmann, pela contribuição na modelagem do transdutor pelo *chair mantri*.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANSYS, Users's Manual, revision 5.0, Swanson Analysis Systems, Inc., vol. IV, 1994.
- BATHE, K. J. *Finite Element Procedures in Engineering Analysis*, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, USA, 1982.
- DRUMHELLER, D. S. Acoustical Properties of Drill Strings. *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 85, n.3, pp.1048-1064, 1989.
- DRUMHELLER, D. S. The Propagation of Sound Waves in Drill Strings. *J. Acoust. Soc. Am.*, vol.97, n.4, pp.2116-2125, 1995.
- GALLEGO-JUÁREZ, J.A. Piezoelectric Ceramics and Ultrasonic Transducers, *J. Phys. E: Sci Instrum.*, vol. 22, pp.804-816, 1989.
- KRASZEWSKI, R. J. & SIGELMANN, R. A. Electrical Multiport Transfer Functions and Efficiency in Layered Media of Piezoelectric and/or Nonpiezoelectric Materials. *J. Acoust. Soc. Am.*, vol.90, pp.2769-2774, 1991.
- NAILLON, M. COURSANT & R. H.; BESNIER, F. Analysis of Piezoelectric Structures by a Finite Element Method. *Acta Electronica*, vol.25, 4, pp.341-362, 1983.
- SEIVA, E.C.N. & ADAMOWSKI, I.C. Modelagem Vibracional por Elementos Finitos de Transdutores de Ultra-Som Piezoeletricos, 9º CBA Congresso Brasileiro de Automática, SBA, Vitória, ES, pp. 1146-1151, 1992.

Transmissão Acústica de Dados em Colunas de Produção de Petróleo para Sensor Permanente de Fundo

Julio C. Adamowski*, Flavio Baitoichi*, Cássio Kuchpili**

* Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (PMC)
Av. Prof. Mello Moraes, 2231 CEP 05508-900 São Paulo - SP

e-mail: jcadamow@usp.br

** CENPES - PETROBRAS

Cidade Universitária, Quadra 7, Ilha do Fundão, Rio de Janeiro - RJ

1. INTRODUÇÃO

A transmissão acústica de dados tem sido utilizada em água [Coates91]. Existem estudos para aplicação de transmissão acústica em colunas de perfuração de poços de petróleo [Drumheller 89, 95], para a telemetria de dados provenientes de sensores de inclinação instalados próximo à extremidade da broca. Uma outra aplicação do sistema de telemetria acústica seria para transmissão de dados de pressão e temperatura do fundo de poços de produção de petróleo.

Os sensores utilizados na monitoração de pressão e temperatura no fundo de poços petrolíferos, são basicamente de dois tipos. O primeiro, utilizado no início da produção, é do tipo autônomo (data logger) e serve para analisar a variação de pressão até um ponto de estabilização. O tempo de estabilização varia de um poço para outro, e como os dados só podem ser lidos após a retirada do data logger, o tempo de aquisição é superdimensionado para o pior caso. O outro, utilizado ao longo da vida útil do poço, se mantém conectado à superfície por meio de um cabo elétrico, permitindo a monitoração periódica das condições do poço.

A motivação deste trabalho é a eliminação do cabo elétrico de conexão de sensores permanentes de fundo (SPF) com a superfície que permitiria uma economia significativa na instalação destes sistemas. Além disso, este mesmo sistema possibilitaria a monitoração em tempo real do início de produção, substituindo com vantagens o data logger.

Uma alternativa para a transmissão das informações de pressão e temperatura, do fundo do poço, sem o uso de cabos de comunicação seria através da utilização de sinais acústicos propagando-se na parede da coluna de produção. Dois pontos fundamentais para a implementação deste sistema é o transdutor piezoeletrico, que tem a função de gerar e receber os sinais acústicos, e o estudo da propagação de ondas acústicas na coluna de produção.

2. DESCRIÇÃO DO SISTEMA

2.1 Transdutor acústico

O transdutor deve ter dimensões compatíveis com o espaço do anular (espaço entre o revestimento do poço e a coluna de produção) e deve ter uma geometria adequada para seu encapsulamento. A potência do transdutor está relacionada ao comprimento da coluna de produção, e da atenuação acústica na mesma. Como ponto de partida, foi prevista uma potência da ordem de 200 Watts. A frequência de operação do transdutor é completamente dependente das bandas passantes da linha de transmissão. Pelo fato da linha de transmissão ser contida por um conjunto de tubos com comprimentos em torno de 9,5 m, ligados um ao outro por uma luva com rosca, ocorrem variações de impedância a cada 9,5 m, o que provoca a formação de um conjunto de filtros passa faixa. A medida que a frequência aumenta, as bandas passantes ficam mais estreitas e as não passantes mais largas