

PNV

# REGIÃO DE TRANSIÇÃO DA CAMADA-LIMITE EM SUBMARINOS E O POSICIONAMENTO DO SISTEMA DE SONAR

C P Pesce, J A P Aranha & C A Martins

Escola Politécnica

Universidade de São Paulo

## Introdução

O posicionamento do sistema de sonar à proa de submarinos deve ser feito à montante da região de transição da camada-limite, objetivando-se minimizar o efeito do ruído característico que é emitido neste processo. Daí a necessidade, logo nos primeiros ciclos da espiral de projeto, de se determinar a posição desta região de transição, onde o escoamento passa de laminar a turbulento.

Esta determinação pode ser realizada a partir de leis empíricas, como a conhecida Lei de Michel, uma vez conhecida a espessura da camada-limite. O primeiro passo na construção da função de espessura da camada-limite é o conhecimento preciso do escoamento externo, que pode ser tratado como potencial. A solução do problema potencial é usualmente conseguida a partir de códigos computacionais que se baseiam em métodos de distribuição de singularidades. No presente trabalho, no entanto, a solução potencial é determinada através de um método variacional direto, onde famílias de funções-teste, formadas por singularidades potenciais elementares, são utilizadas de forma a compor um espaço funcional de representação.

A metodologia, implementada na forma de um programa computacional - SUBVAR, traz resultados que apresentam boa concordância com dados constantes da literatura, permitindo não apenas recompor o campo externo de velocidades, mas também avaliar, com precisão bastante satisfatória, a posição de transição da camada-limite. O método foi testado para dois corpos axi-simétricos, cujos dados e resultados experimentais foram extraídos de Goldstein, 1965, e, adicionalmente, para um modelo estudado por Huang & Hannan, 1975. São apresentados alguns resultados de estudos realizados com submarino típico.

## A Transição da Camada-limite e o Método de Michel

O fenômeno de transição é, na realidade, um fenômeno de instabilidade do escoamento laminar. O parâmetro que caracteriza a perda de estabilidade é o número de Reynolds "corrente",  $Re_x = U_\infty x / \nu$ , onde  $U_\infty$  é a intensidade da velocidade no infinito e  $x$  é a coordenada curvilinear medida ao longo de uma linha de corrente sobre o corpo, a partir do ponto de estagnação. O valor crítico, onde ocorre a instabilidade pode ser obtido a partir da equação de Orr-Sommerfeld; ver, p.ex., Schlichting, 1968. A partir do valor crítico, as perturbações no escoamento tendem a ser amplificadas, até que o escoamento se torne turbulento em uma abscissa,  $x_c$ , correspondente a um número de Reynolds  $Re_{x_c}$ . O estudo do fenômeno de transição é fundamentalmente observacional, resultando em leis empíricas, que permitem determinar  $Re_{x_c}$ , uma vez conhecido o escoamento externo à camada-limite, o qual pode ser modelado dentro da teoria potencial. Conhecida a função de velocidade potencial  $U(x)$  ao longo de uma linha de corrente, a equação dinâmica na camada-limite pode ser integrada através do método de Pohlhausen (ver, p.ex., Schlichting, 1978), que assume como perfil de velocidades um polinômio de quarto grau na coordenada normal. Com a clássica aproximação de Thwaites, a espessura de quantidade de movimento da camada-limite  $\delta_2$ , pode ser posta na forma,

$$\frac{U(x)\delta_2^2(x)}{\nu} = \frac{0.45}{l^2(x)U^5(x)} \int_0^x l^2(\xi)U^5(\xi)d\xi \quad (1),$$

válida para corpos alongados, onde  $l(x)$  é a distância entre duas linhas de corrente consideradas sobre o corpo na posição  $x$ . Michel, em 1952, derivou lei empírica relacionando o número de Reynolds associado à espessura de quantidade de movimento,  $Re_g = U(x)\delta_2(x)/\nu$ , com  $Re_{x,\nu}$  (White, 1974, p. 442)

$$Re_{g,\nu} = 2.9 [Re_{x,\nu}]^{0.4} \quad (2).$$

Definindo-se o número de Reynolds de avanço  $Re = U_\infty L/\nu$ , onde  $L$  é o comprimento do corpo, segue então que a transição se dará quando,

$$Re = F(x)$$

com

$$F(x) = 4.2 \times 10^4 \left[ \frac{(x/L)^4}{G^5(x)} \right] \quad (3)$$

$$G(x) = 0.45 \frac{U(x)}{U_\infty} \frac{1}{L} \int_0^x \left( \frac{l(\xi)}{l(x)} \right)^2 \left( \frac{U(\xi)}{U(x)} \right)^5 d\xi$$

O nível de turbulência presente no escoamento principal pode ser considerado, através da teoria semi-empírica de Van Driest e Blumer (ver White, 1974). O valor do número de Reynolds, em (3) deve então ser substituído pelo seu valor efetivo, função do índice de turbulência  $T$  (%).

$$Re_g = \left( \frac{39200T^2}{(1 + 132500T^2)^{1/2}} - 1 \right)^2 Re \quad (4)$$

### O Método Variacional para a Solução do Problema Potencial

A aplicação do método de Michel depende do conhecimento do escoamento externo, que pode ser suposto potencial. Diversos métodos podem ser utilizados, como por exemplo aqueles baseados na distribuição de singularidades (funções de Green) sobre a superfície do corpo, que após formulação integral reduzem o problema à solução numérica de um sistema de equações lineares, de ordem sempre muito avantajada, igual ao número de painéis de discretização com que a superfície do corpo é representada, sempre da ordem de  $10^4$ . Um método alternativo, no entanto, é o método variacional (Aranha & Pesce, 1989; Pesce & Simos, 1996). Nele a solução potencial é representada em um espaço varrido por *funções-teste*, compostas por singularidades elementares, tais como polos, dipolos, linhas de polos, linhas de dipolos e anéis de vórtices. Matematicamente, estas singularidades constituem um espaço funcional de representação. Fisicamente, tais singularidades são dispostas no interior do corpo, de forma a induzir a representação do escoamento. Um exemplo trivial é o de um dipolo, que posicionado no centro de uma esfera, reproduz a perturbação do escoamento por ela causada em um fluxo uniforme. Neste exemplo trivial esta solução é mais do que uma aproximação, é exata. Anéis de vórtices, por outro lado, podem ser utilizados para "mimetizar" o escoamento em torno de bordas de pequeno raio de curvatura, como no caso de cilindros finitos avançando ao longo de seu eixo (Pesce & Simos, 1996). Uma escolha conveniente de uma família de funções-teste permite portanto reproduzir o escoamento externo em torno das mais variadas formas.

No Método Variacional, a equação de Laplace, e respectivas condições de contorno que regem o potencial  $\phi(x, y, z)$  (de impermeabilidade na superfície do corpo e de perturbação nula ao longe), são transformadas em uma equação fraca

$$G(\phi, \psi) = V(\psi)$$

$$G(\phi, \psi) = \int_S (\nabla \phi \cdot \bar{n}) \psi dS \quad (5),$$

$$V(\psi) = - \int_S \bar{U}_\infty \cdot \bar{n} dS$$

onde  $S$  é a superfície do corpo. O enunciado do problema a ser resolvido pode então ser escrito: determinar  $\phi(x, y, z)$  a partir da equação fraca, válida para qualquer  $\psi(x, y, z)$ , que satisfaça  $\int_V (\nabla \psi)^2 dV < \infty$ . Se  $T_j(x, y, z)$  representa uma função-teste, - que deve ter o Laplaciano nulo e satisfazer a condição de perturbação nula no infinito - e se as seguintes aproximações para as funções  $\phi(x, y, z)$  e  $\psi(x, y, z)$  forem escritas na forma de Séries de Fourier Generalizadas,  $\phi(x, y, z) \equiv \sum_{j=1}^N a_j T_j(x, y, z)$  e  $\psi(x, y, z) \equiv \sum_{j=1}^N b_j T_j(x, y, z)$ , a equação fraca (5) se transforma em um sistema linear algébrico

$$\begin{aligned} [G] \{a\} &= \{V\} \\ G_{ij} &= G(T_i, T_j) = G_{ji} \\ V_i &= V(T_i) \end{aligned} \quad (6).$$

Pode-se mostrar (Aranha & Pesce, 1989; Pesce & Simos, 1996) que a equação fraca pode ser estabelecida a partir de uma condição de estacionariedade da função Lagrangiana correspondente. A solução aproximada é portanto correta até segunda-ordem. Mais do que isso, o sistema linear é real, simétrico e de ordem bastante reduzida, posto que não mais do que algumas poucas dezenas de funções-teste são necessárias para uma fiel representação. Deve ser enfatizado que a parte mais onerosa do trabalho numérico recai no cálculo das integrais sobre a superfície do corpo, eq. (5), para o cômputo da matriz  $[G]$  e do vetor  $\{V\}$ .

### Validação

O método variacional foi plenamente validado em diversos contextos, incluindo-se o problema de interação de corpos flutuantes com ondas de superfície (ver, Pesce, 1988; Aranha & Pesce, 1989; Martins, Aranha & Pesce, 1994; Pesce & Simos, 1996). Alguns exemplos de validação são apresentados nas figuras abaixo. A figura 1 refere-se à solução potencial em torno de uma esfera, com o uso de apenas 1 anel de vórtices. A tabela 1 apresenta o coeficiente de massa adicional de um elipsóide. Os resultados numéricos são confrontados com a solução exata, com perfeita concordância. A figura 2 mostra o coeficiente de pressão ao longo de dois corpos axi-simétricos, denominados por Goldstein, 1968, modelos "A" e "B". A figura 3 mostra o coeficiente de pressão calculado para a proa de um corpo axi-simétrico, denominado "T", por Huang & Hannan, 1975. Nestes dois últimos casos o confronto da solução variacional é feita com resultados experimentais. A concordância é excelente.

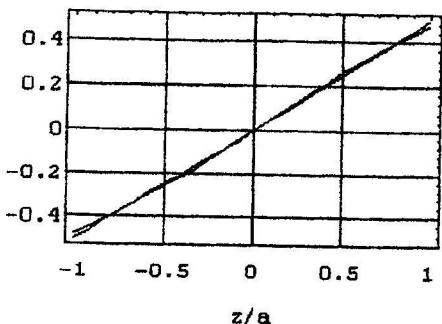
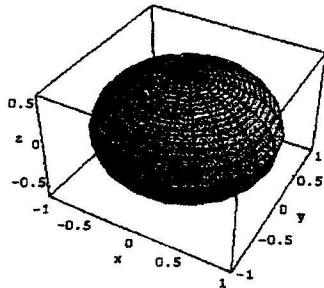


Figura 1. Potencial adimensional de velocidade como função da coordenada axial para uma esfera de raio  $a$ , calculado sobre o corpo através do método variacional, comparado à solução exata. Apenas um anel de vórtices de raio  $R/a = 0.25$  usado como função-teste.

Tabela 1. Coeficiente adimensional de massa-adicional para um elipsóide de revolução avançando ao longo do eixo de revolução. ( $a$  é o semi-eixo de revolução;  $b$  é o semi-eixo maior). Apenas anéis de vórtices de raio  $R/b$  utilizados como funções-teste (FT).  $N_{FT}$  é o número de funções-teste.

$$a_{33} = \frac{m_{33}}{4/3 \pi \rho b^3}$$

$a/b$	$N_{FT}$	$R/b$	Método Variacional	Paradigma (Newman, 74)
0.6	1	0.15	0.564491	0.56
0.2	2	0.15, 0.30	0.617843	0.61



A implementação do método de Michel foi validada, comparando-se seus resultados para os modelos "A", "B" e "T". A figura 4 mostra a coordenada da linha de transição, tendo como parâmetro o nível de turbulência  $T$  (%) do escoamento principal. É interessante enfatizar que este parâmetro é de difícil quantificação experimental, particularmente na década de '30, quando os experimentos relatados em Goldstein foram realizados. A figura 5 mostra os regimes de escoamento correspondentes ao modelo "T", comparados às medidas realizadas por Huang & Hannan, 1975. A concordância é bastante satisfatória.

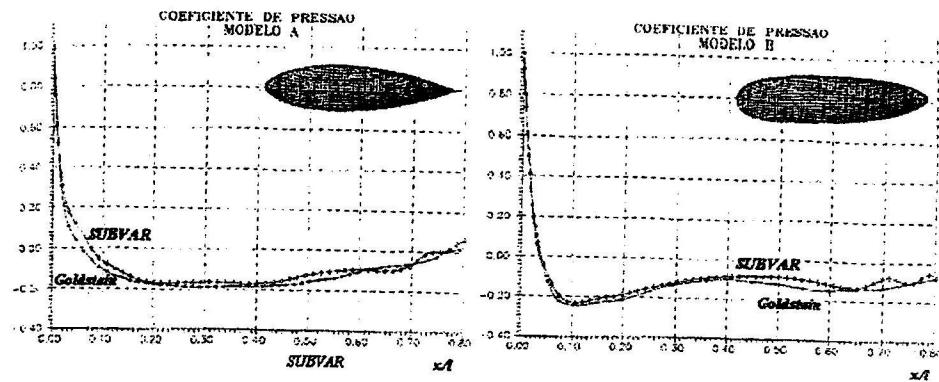


Figura 2. Coeficiente de pressão sobre dois corpos axi-simétricos (modelos "A" e "B") através do método variacional (programa SUBVAR), comparado a resultados experimentais (Goldstein, 1965). Dipolos, linhas de polos, anéis de polos e linhas de dípolos usados como funções-teste.

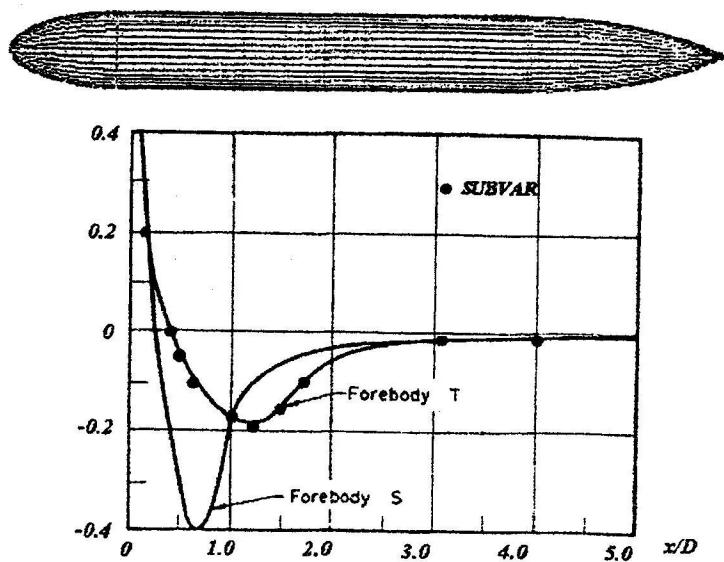


Figura 3. Coeficiente de pressão no corpo de entrada de um modelo axi-simétrico (modelo "T") através do método variacional (programa SUBVAR), comparado a resultados experimentais (Huang & Hannan, 1975). Dipolos, linhas de polos, anéis de polos e linhas de dípolos usados como funções-teste.

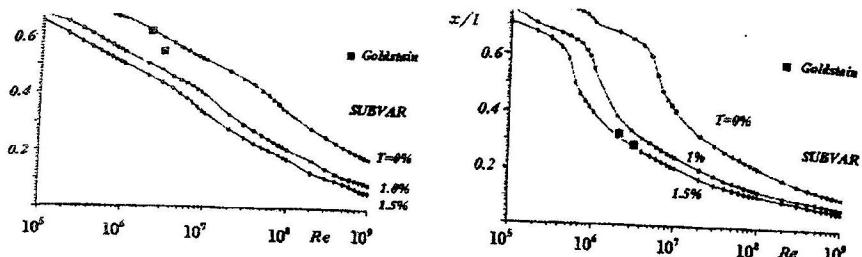


Figura 4. Coordenada da linha de transição em função do número de Reynolds principal, para os modelos "A" e "B" (programa SUBVAR), comparado a resultados experimentais (Goldstein, 1965). T (%) é o nível de turbulência.

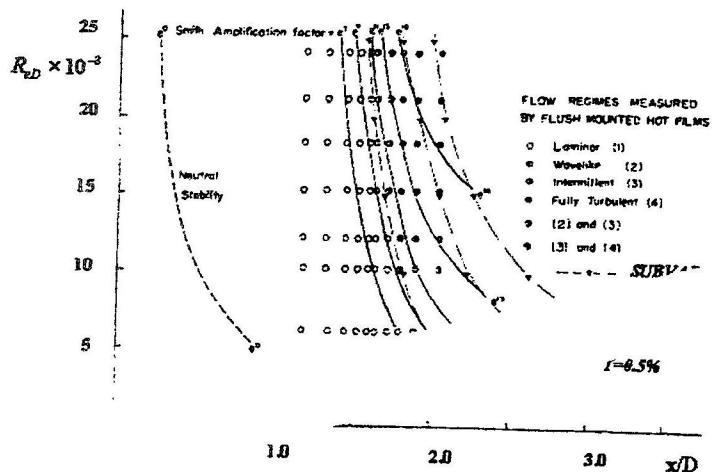
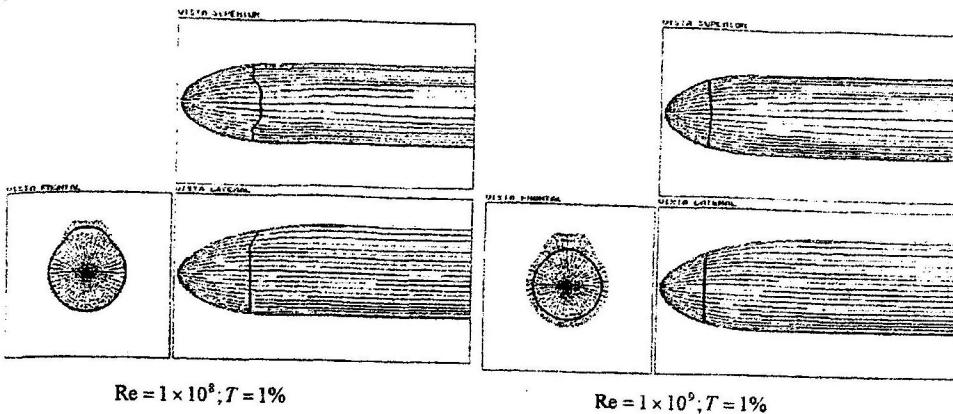


Figura 5. Diagramas de regimes de escoamento em função do número de Reynolds (baseado no diâmetro  $D$ ) e da coordenada axial, para o modelo "T" (programa SUBVAR), comparado a resultados experimentais (Huang & Hannan, 1975). T (%) é o nível de turbulência.

### Exemplos de Aplicação

Por fim, a figura 6 apresenta o corpo de entrada de um submarino típico, com as respectivas linhas de corrente, e a posição da *linha de transição*, determinados pelo programa SUBVAR. Neste exemplo, o nível de turbulência do escoamento principal foi tomado como 1%. Notável é o retardamento da transição na parte superior. Este fato se deve à diminuição da velocidade nesta região, devido à desflexão do escoamento para as regiões laterais do corpo.



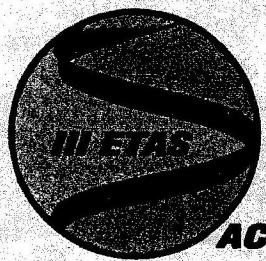
**Figura 6. Linhas de corrente e de transição no corpo de entrada de um submarino típico.**

### Referências

- Aranha, J.A.P & Pesce, C.P. *A Variational Method for Water Wave Radiation and Diffraction Problems*. J.Fluid Mech. (1989), vol.. 204, pp. 135-157.
- Goldstein, S. *Modern developments in Fluid Dynamics*. Dover Pub. Inc., 1965.
- Huang, TT & Hannan, DE. *Pressure Fluctuations in the Regions of Flow Transitions*. NSRDC, 1975, 50 pp.
- Martins, CA, Aranha, JAP & Pesce, CP. *Estimação da Transição da Camada Limite em Corpos Alongados*. XIV Congresso Ibero Latino-Americano de Métodos Computacionais em Engenharia. S.P., dez., 1993; pp. 636-645.
- Newman, J.N. *Marine Hydrodynamics*. The MIT Press, 1978, 402 pp.
- Pesce, CP. *Estudo do Comportamento de Corpos Flutuantes em Ondas: um Enfoque variacional e Aplicações da Teoria do Corpo Eobelto*. Tese de Doutoramento, Escola Politécnica, USP, 1988, 200 pp..
- Pesce, CP & Simos, AN. *A Family Of Vortex Rings And A Variational Application On Potential Flows Around Three-Dimensional Bodies*. 1996 (submetido).
- Schlichting, H. *Boundary layer Theory*. McGraw-Hill Book Co; 7<sup>A</sup>. edição, 1979, 817 pp.
- White, F. *Viscous Fluid Flow*. McGraw-Hill Book Co; 1974, 725 pp.

### Agradecimentos

Agradecemos ao Ministério da Marinha a oportunidade oferecida para o desenvolvimento e publicação do presente trabalho.



**III ENCONTRO DE  
TECNOLOGIA EM  
ACÚSTICA SUBMARINA**

**ANEXO**

**23 e 24 de setembro  
IPqM - Rio de Janeiro**

*IPqM*

## LISTA DE TRABALHOS

- 1 • Projeto de Nacionalização dos Tradutores Acústicos dos Sonares EDO 610 e AN/SQS- 26BX  
*Fernando L. de Magalhães, Orlando J. R. Afonso, Celso M. Koga e Conrado G. Barbosa* IPqM (MB) - CONSUB
- 2 • Desempenho Eletroacústico do Lote-Piloto Nacional de Transdutores dos Sonares EDO 610 e AN/SQS-26BX  
*Fernando L. de Magalhães, Orlando J. R. Afonso, Celso M. Koga e Conrado G. Barbosa* IPqM (MB) - CONSUB
- 3 • Modelagem de Transdutores Piezoeletricos de Potência  
*Júlio C. Adamowski, Marcelo Y. Matuda, Flávio Buiochi e Celso M. Furukawa* • Escola Politécnica/USP
- 4 • Transmissão Acústica de Dados em Colunas de Produção de Petróleo para Sensor Permanente de Fundo  
*Júlio C. Adamowski, Flávio Buiochi e Cássio Kuchpil* • Escola Politécnica/USP - CENPES/Petrobras
- 5 • Seismic Interface Wave Sonar  
*Tom Muir* • Universidade do Texas
- 6 • Influência da Nacionalização das Matérias-Primas nas Propriedades Piezoeletricas de Cerâmicas Tipo PZT Utilizadas em Transdutores Eletroacústicos  
*Maria A. P. dos Santos* • IPqM (MB)
- 7 • Desenvolvimento e Implementação de um Protocolo para Avaliação de Transdutores Ultra-Sônicos  
*André V. Alvarenga, João C. Machado e Wagner C. A. Pereira* • COPPE/UFRJ
- 8 • Região de Transição da Camada-Limite em Submarinos e o Posicionamento do Sistema de Sonar  
*Celso P. Pesce, J. A. P. Aranha e C. A. Martins*  
Escola Politécnica/USP
- 9 • Predição do Campo Acústico Gerado por Vibrações de Máquinas em Sistemas Oceânicos  
*Severino F. da S. Neto e Luiz A. V. Pinto* • COPPE/UFRJ
- 10 • Sistema para Estimativa de Assinatura Acústica, Gerenciamento e Tratamento de Dados de Ruído e Vibração de Navios e Submarinos  
*Celso Di Domenico, Severino F. da S. Neto e Carl H. Albrecht*  
CPN (MB) - COPPE/UFRJ
- 11 • Análise Acústica de um Motor Diesel Marítimo através do Método dos Elementos de Contorno  
*Luiz A. V. Pinto e Severino F. da S. Neto* • COPPE/UFRJ

- 12 • Geração de Ruído por Vorticidade  
*CC(EN) Álvaro L. de S. Pinto* • IPqM (MB)
- 13 • Estimativa dos Níveis de Vibração Estrutural e de Ruído em Plataformas Offshore  
*Arcanjo Lenzi e Luciano C. de Souza* • UFSC
- 14 • Irradiação Sonora de Placas Planas Infinitas com uma Viga de Reforço  
*Vitor Litwinczik e Arcanjo Lenzi* • UFSC
- 15 • Fluxo de Energia entre Placas Acopladas pelo Método da Mobilidade  
*Paulo Bonifácio e Arcanjo Lenzi* • UFSC
- 16 • Sonares Biológicos: Geração de Sons e Vórtices em Cetáceos (Golfinhos e Baleias) e a Produção de “Insights” para a Guerra Acústica  
*CF (EN) Maurício Kiwielewicz* • IPqM (MB)
- 17 • Sistema Portátil para Transmissão Rádio de Sinais de Hidrofones  
*Marcos T. Ferraz e Carlos E. Parente* • COPPE/UFRJ
- 18 • Perfiladores Acústicos Doppler de Correntes  
*CT Marival de S. Carvalho* • IEAPM (MB)
- 19 • Método para Detecção de Ecos de Reverberação em Meios Homogêneos Multicamadas  
*Marcelo de A. Duarte, João C. Machado e Wagner C. A. Pereira*  
COPPE/UFRJ
- 20 • Emprego de Redes Neurais, Algoritmos Genéticos e Lógica Fuzzy em Processamento de Sinais  
*CT (EN) João A. A. do Amaral* • IPqM (MB)
- 21 • Implementação das Análises Lofar e Demon  
*Willian S. Filho* • IPqM (MB)
- 22 • The Gramma - Art Architecture Applied on Passive Sonar Classification Problem  
*Cláudio C. Nehme* • EMBRAPA/CNPS
- 23 • Algoritmo para a Determinação do Desempenho do Sonar CSU-83 Usando o Método da Amostragem por Importância  
*Cleide V. da S. Rodrigues* • IPqM (MB)
- 24 • Detecção de Sinais: Técnicas Convencionais e Novas Tendências  
*Cleide V. da S. Rodrigues e Antonio Petraglia* • IPqM (MB) - COPPE/UFRJ
- 25 • Simulação de Sinal Gerado por Navio e Incidente em Array Linear para Aplicação em Algoritmos de Processamento de Sinal em Arrays  
*Jorge P. Galante* • IPqM (MB)

- 26 • Tracking-Based Active Sonar Waveform Selection**  
**Peter Willett** • Universidade de Connecticut
- 27 • Holografia Acústica, uma Breve Revisão**  
**William A. Barbosa e Arcanjo Lenzi** • UFPR - UFSC
- 28 • O Atual Sistema de Previsão de Alcance e Traçado de Raios Sonoros em uso na MB e sua Evolução**  
**CC Cláudio Alberto Corbelli Cátia G. M. da Silva** • IPqM (MB)
- 29 • Propagação do Som em Lâminas de Águas Rasas por Acústica de Raios**  
**Arcanjo Lenzi e Ricardo Vitoy** • UFSC
- 30 • Investigações sobre a Propagação da Onda Sonora por Modos Normais em Águas Rasas na Região de Cabo Frio**  
**Agueda Maria V. Alves** • COPPE/UFRJ
- 31 • Aplicação da Análise Espectral Parcial ao Estudo de Campos Sonoros**  
**CF (EN) Casimiro José Gabriel** • IPqM (MB)
- 32 • Implementação Numérica da Aproximação Parabólica da Equação da Onda Aplicada a Propagação do Som no Mar**  
**Valéria S. Rego e Carlos E. Parente** • COPPE/UFRJ
- 33 • Modelo de Propagação de Ultra-Som para Estimar Simultaneamente Velocidade e Espessura de Meios Multicamadas**  
**Ana V. D. Grecco, Wagner C. A. Pereira e João C. Machado**  
COPPE/UFRJ
- 34 • Análise Quantitativa de Meios Heterogêneos**  
**Carlos D. Maciel e Wagner C. de A. Pereira** • COPPE/UFRJ
- 35 • Cálculo do Espalhamento Acústico através do Método de Simulação por Fontes Elementares**  
**Paulo H. T. Zannin** • Centro Politécnico/UFPR
- 36 • Determinação da Posição de uma Fonte Sonora Monocromática (Banda Estreita) em Movimento Retilíneo Uniforme no Interior de um Guia de Ondas através de Coincidência de Modos Normais (Matched-Mode)**  
**CT Amaury P. Rocha e Carlos E. Parente** • DHN (MB) - COPPE/UFRJ