



IMAGE PROCESSING TECHNIQUES APPLICATIONS TO SHIP PAINTING ANALYSIS.

Odair Caltabeloti
Technological Research
Institute(IPT), São Paulo,
BRAZIL

Oyan Kai
São Paulo University,
São Paulo, BRAZIL

Toshi-ichi Tachibana
São Paulo University,
São Paulo, BRAZIL
tatibana@usp.br

Kanji Yamagishi
JICA
Japan International
Cooperation Agency

Takeshi Shinoda
Kyushu University -
JAPAN

ABSTRACT

This paper presents a procedure for a evaluation of painted steel plates after some period of rusting. Japanese and Brazilian paints exposed to a marine environment during one year were used, and many grades of rusting for each type of paint were obtained and compared with Japanese results. To measure the level of corrosion, a method of image processing was applied.

All the results, as well as the methodology for this evaluation, can be used as parameters for maintenance of ship hull and offshore structure surfaces and also improve marine preservation including the environmental problems generated due to use of paints that can have systems in Harmony with marine behavior, in consequence the human being benefits.

1. INTRODUCTION

In the field of corrosion and protection of metals with coatings, the usual methods of evaluation of rusted or corroded surfaces exposed to atmospheric environment have been during years the visual inspection of the pin hole detection on the painted surface.

The recent improvement of image processing with personal computers has made possible apply the mathematical morphology and the image processing techniques for many field of technology, such as the evaluation of micro-structures with the automatic counting of grains (metallography) or the quantitative analysis of biological material.

On the other hand, the application of an image processing method could be helpful in order to

reduce subjective criteria for evaluation, and it could lead to a more quantitative analysis, in such a way that it would help to improve the quality of protection materials for marine use.

2. MATHEMATICAL MORPHOLOGY AND IMAGE PROCESSING

A digital image is a function that maps a gray scale or a colored image into a matrix where each point (x,y) is represented by the matrix element, called *pixel*. Each pixel's intensity is represented by 1, 2, 4, 8 or more bits of memory. One bit is sufficient for simple "black & white" operation, and for 256 different colors or tons of gray 8 bits are necessary.

The usual color-component encoding schemes involve the use of a *color map*. The values stored are treated as addresses into a table of color defined by their red, green and blue components.

There are many techniques recently developed to process images, which are classified according to the *type of problem* they are able to solve. Techniques like *digitization*, *enhancement*, *restoration* and *segmentation* of images can be achieved by morphological approaches. By applying morphological operators, objects with special features can be identified and extracted. Finally, a combination of statistical computations and syntactic analysis can offer some insights about the information stored in the original image.

The most useful image processing technique for evaluation of the level of corrosion seems to be the separation of the preserved surface and the rusted surface in different layers and the evaluation for each layer. This technique is

00001

usually called thresholding and if the image parameters (brightness, hue, saturation) exceeds a threshold, a pre-defined or an average color is displayed. In this sense, it becomes possible to reduce the number of colors from 256 (for images of 8 bits) or even 16 million (for full color images) to a limited number of mean colors between thresholds.

3. METHODS OF EVALUATION

For the evaluation of the level of corrosion in a rusted surface at first it becomes necessary to establish values used as a reference for comparison. ASTM - Annual book 1996 - standard - section b Paints - Related Coatings and Aromatics - vol. 06-02 Paint - Products and Applications; Protective Coating, Standard test Method for evaluating Degree of Rusting on painted steel surface - D610-95 and guidance for classification on coating condition - UR Z 10.1 and Z 10.2 of Nippon Kaiji Kyokai - Japanese Ship Classification Society. Figure 1(a) shows the typical rust (1) and to (2) grade no. 4 (10% rust). For this and all the other standard surface grades the image scanning was performed and the results obtained showed a good relationship between the percentage of rust that is written in this standard and the ratio of corroded area and total surface area.

At first, the image was separated in three thresholds, the first corresponding to the painted surface (white), the second to the softly rusted or contaminated surfaces (light gray), and the third to the rust spots or corroded parts of the surface (black).

The evaluation procedure considered the heavier corrosion level and the surface was separated in two levels, as shown in figure 1(c).

After that, the image was saved as a bitmaps file and converted to an encapsulated post script (eps) file. The vectored form of an eps image is more practical not only for printing output, but also for further calculation. A software was developed for counting and evaluation on the surface condition. An preliminary computer program was developed only for testing the methodology and the main parameters for output were:

1. the number of elements;
2. the average rust size;

3. the number of elements of rust with each size.

For item 3, the total number of elements was separated in groups according to the area of each element when compared to the total area of study, and a statistical curve was done. The curve uniformity was verified as the number of elements was increased.

4. EXPERIMENTAL DATA

The evaluation was performed with 75 pieces, painted with the Brazilian and Japanese ship's hull paints and exposed to marine environment. Each test piece measured 200 x 300 mm and was divided in four parts, each one with a different number of paint layers, and different thickness as a consequence.

After periods of rusting of 12 and 18 months respectively, each test piece was photographed and the images were scanned. The evaluation method explained in the item 2 was therefore performed. As the paints used were basically epoxy with high performance, the most deteriorated part of the test pieces corresponded to the primer coating only, and it's expected to obtain a better evaluation during the next years. The comparison with data supplied by the Japanese paints manufacturer will be done later.

Up to the present moment, the present moment, the comparison of the results obtained with many samples was helpful to check up the image processing evaluation system and the comparative study of Brazilian and Japanese research shall be the next step of the present study.

5. CONCLUSIONS

Concerning the evaluation procedure, the most important advantages observed are the following:

- of course, there is still the influence of the person who is on charge of the evaluation, because this person will decide what is the most important level of rusting, when separating the image thresholds. However, it was verified in this study that the percentage of rusting according to ASTM D610-95, is very close the contamination (light gray and gray layers in Fig 1(b)). Therefore, it's always necessary to use

00002

these or similar "calibration" values, to avoid as much as possible subjective criteria, for example, ASTM and NK-Nippon Kaiji Kyokai International reference.

- the curve obtained by the separation of elements according to the rusted area is the most useful information. It was verified that when the rust grade increases, not only the peak of this curve becomes higher, but it can also move to the right, when the area of each rust spot increases with time. For some paints, the first behavior described above (nucleation) and growing from the first spots) was verified while for others, the second one was verified.
- the improvement of an evaluation criteria for paints could be helpful in order to reduce the problem of corrosion, therefore contributing for the development of materials acting in harmony with the marine environment, and the more optimized systems.

6. ACKNOWLEDGEMENTS

The authors wish to acknowledge the contributions of all researchers of IPT and professors of São Paulo University (USP) and also all the colleges for the encouragement and support for this research.

The thanks are also extended to the Brazilian Development Organizations, CNPq - "Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico" and FAPESP - "Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo" for supporting some items of

this research. Special Thanks to the Japan International Cooperation Agency (JICA), for all the equipment and materials that were supplied for this work.

7. REFERENCES

- [1] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 1996. Standard test method for evaluating degree of rusting of painted steel surfaces. In: ANNUAL BOOKS OF THE ASTM STANDARDS. Philadelphia, 1996, V.06.01, p. 13-15.
- [2] MARTINS, F.P.R. 1993 Morphological Image Processing System. MsC Dissertation, Wales University Press. 128p.
- [3] RIMMER, S., 1993 Bit-mapped Graphics. 2 ed. New York, WINDCREST/McGraw-Hill Inc. 484p.
- [4] STEEL STRUCTURES PAINTING CONCIL, 1989. Steel structures manual. Pittsburgh. V.1.
- [5] NIPPON KAIJI KYOKAI, 1993 Guidance for classification TZ2932 P0020 Tokyo p 80-95.
- [6] Oyan Kai, 1997. APLICAÇÃO DAS TÉCNICAS DE PROCESSAMENTO DE IMAGENS NA ANÁLISE DA CORROSÃO DE CASCO PINTADO DE NAVIO, MsC. Dissertation, University of São Paulo, 104p.

00003

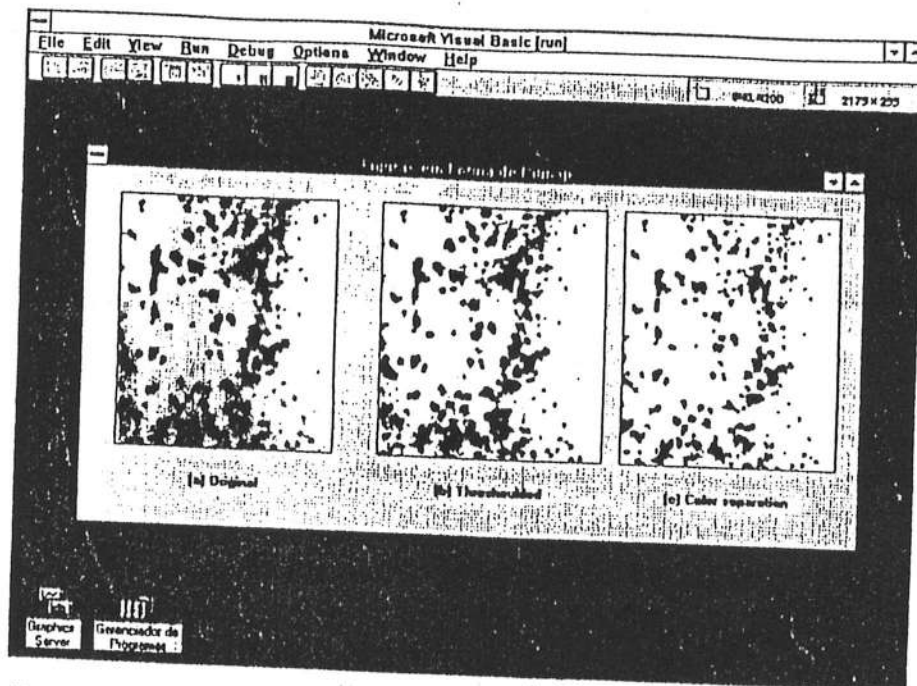


FIGURE 1 - First steps of the evaluation procedure: (a) scanned image; (b) thresholded image (three levels); (c) separation in two levels for output.

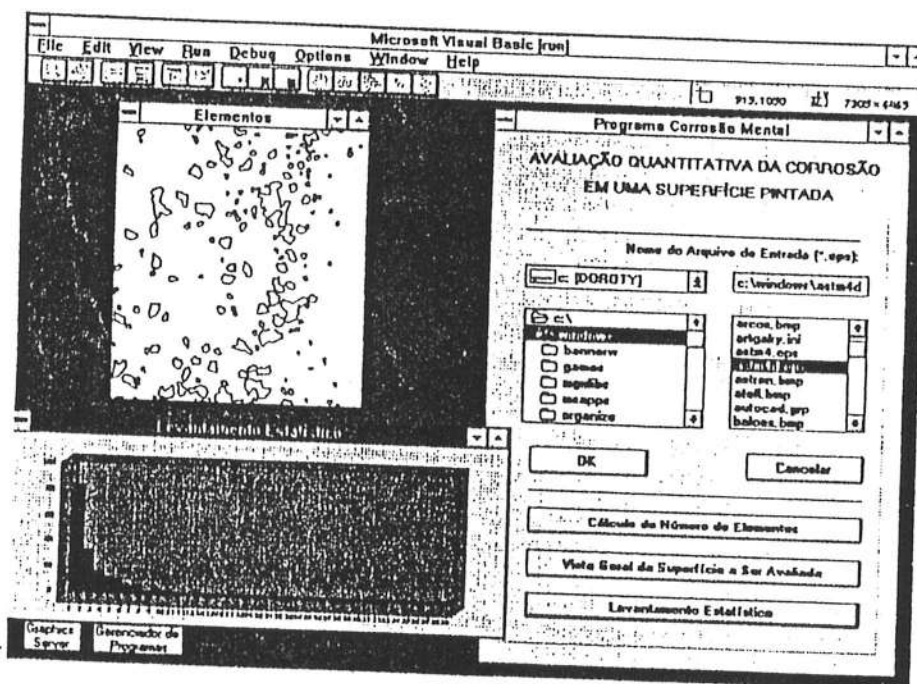


FIGURE 2 - Results obtained for typical rust grade number 6 of ASTM-D610-85.

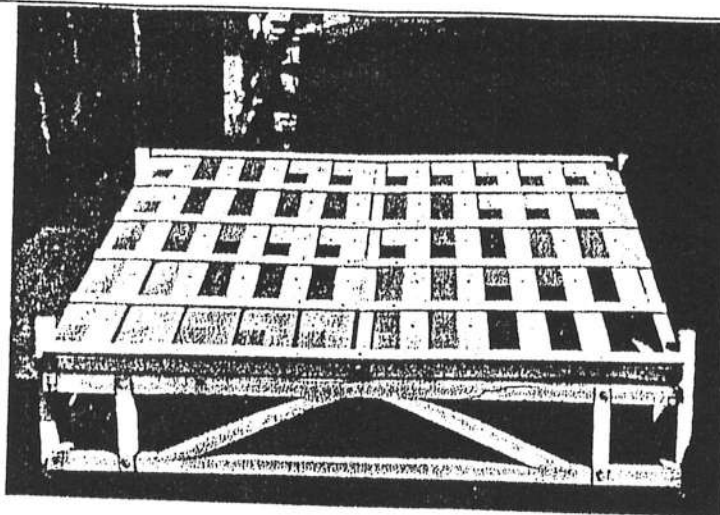
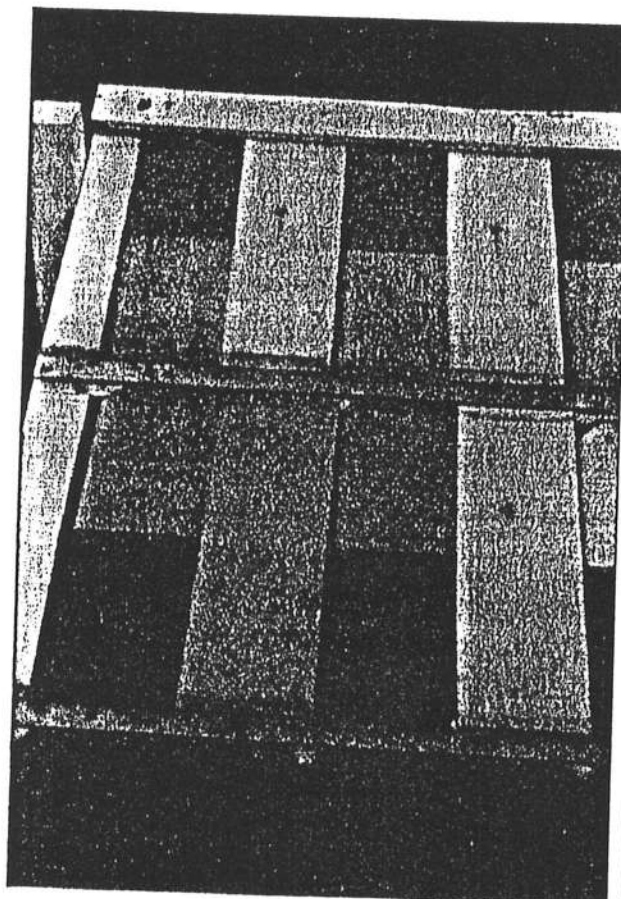


Photo 1 - Test Pieces Exposition

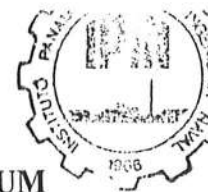


10	-ETS	90	-ETS
-EHB	-EHB	-EHB	-EHB
-HEP	-HEP	-HEP	-HEP
	-ETS		-ETS
-HEP	-HEP	-HEP	-HEP

20	-REV	60	-EWJ
-DMU	-DMU	-DMU	-DMU
-TEK	-TEK	-TEK	-TEK
	-REV		-EWJ
-TEK	-TEK	-TEK	-TEK

Photo2 - Test Pieces painted with different number of paint layers

00005



MODELO ECONÔMICO-OPERACIONAL PARA O DIMENSIONAMENTO DE UM SISTEMA INTERMODAL DE TRANSPORTE NA HIDROVIA TIETÊ-PARANÁ

R. C. BOTTER, A. B. MENDES

Departamento de Engenharia Naval e Oceânica da USP - São Paulo (SP) - Brasil

E-Mail: rcbotter@usp.br / andbergs@usp.br

JPEN XV COPINAVAL Meeting

Montevideo - Uruguay

11 - 14 Nov. 1997

RESUMO

O dimensionamento de um sistema de transporte intermodal de carga requer uma metodologia apropriada para lidar com as interações entre os modais e que também minimize o custo total de transporte. Este trabalho mostra um modelo econômico-operacional que está sendo desenvolvido e aplicado junto a Hidrovia Tietê-Paraná.

ABSTRACT

The design of an intermodal freight transportation system requires an appropriate methodology that would consider the interactions between the different modals and also minimize the global transportation cost. This paper shows an economic and operational model that is being developed and applied to the Tietê-Paraná Waterway.

1. INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

O sistema hidroviário Tietê-Paraná é um empreendimento que vem ganhando cada vez mais importância, devido à crescente utilização como meio de transporte alternativo, e principalmente como perspectiva de ser um elo de ligação com o MERCOSUL. O seu uso tem sido fomentado principalmente pela expectativa de em breve, ter o seu tramo sul interligado ao tramo norte e ao tramo Tietê, com a conclusão das eclusas do conjunto Três Irmãos-Jupia, prevista para o início de 1998.

No início da década de 80, quando as obras de infra-estrutura hidroviárias ainda estavam em fase de projeto/concepção e construção, a prática da navegação era para o transporte de produtos com baixas distâncias e na maioria, entre reservatórios. Os principais produtos eram: cana-de-açúcar, álcool e derivados de petróleo, calcário e areia. Estes produtos caracterizaram um primeiro estágio, quando a hidrovia era conhecida como Hidrovia do Álcool.

Com a inauguração do Canal de Pereira Barreto em 1991, observou-se uma mudança no perfil do transporte praticado, com a entrada das commodities agrícolas. Estas cargas começaram a serem escoadas a partir da região Centro-Oeste via a hidrovia Tietê-Paraná, com destino ao mercado externo.

Impulsionadas pelas melhorias na via navegável e pela possibilidade de atingir distâncias hidroviárias ainda maiores, algumas empresas passaram a avaliar a possibilidade de utilização do modal hidroviário para compor um dos trechos do transporte de seus produtos.

Contudo, um sistema intermodal de transporte é bastante complexo do ponto de vista operacional, pois se trata de um transporte combinado entre diferentes modais, aos quais se interpõem os terminais que são, na sua maioria, dotados de silos ou tanques.

A dificuldade no dimensionamento deste sistema reside no fato de que os diversos modais operam de forma independente e de maneira assíncrona, podendo causar problemas de congestionamento e formação de filas em terminais. Estes problemas se traduzem em elevados custos de transportes e também de armazenagem. Busca-se então, um dimensionamento em que o fluxo de carga seja integrado ou balanceado entre os modais, e que o fator de utilização - ou fator de aproveitamento - dos veículos de carga seja razoável.

Portanto, o objetivo desta pesquisa consiste no desenvolvimento de uma sistemática para o dimensionamento econômico-operacional do transporte intermodal de cargas pela Hidrovia Tietê-Paraná. Esta sistemática será consubstanciada em um modelo de simulação computacional associado a planilhas de custo.

2. METODOLOGIA

A modelagem deste problema de transporte poderia utilizar a teoria de filas, a qual tornaria o modelo bastante complexo e de difícil resolução. Entre as ferramentas que possibilitam a resolução de problemas como este, está a técnica de simulação probabilística, que tem se mostrado muito eficiente, e que ultimamente tem tido maior utilização devido ao avanço computacional (hardware e software).

A aplicação de técnicas de simulação para análise e dimensionamento de problemas de transporte, consiste basicamente na montagem de um modelo computacional, que após processado várias vezes com os dados reais do sistema e com as modificações que se pretendem introduzir, produzirão resultados que permitirão ao usuário escolher a melhor alternativa sob o ponto de vista operacional e econômico.

Os objetivos implícitos na simulação são os de descrever comportamentos de sistemas; construir teorias ou hipóteses que explicam o comportamento observado; e usar o modelo para prever um comportamento futuro (efeitos produzidos por mudanças no sistema ou em sua forma de operar). Os modelos utilizados são chamados de input-out, ou seja, produzem uma determinada saída para uma dada entrada, conforme ilustrado na Figura 1.

Os principais benefícios resultantes de um processo de simulação são:

- poder testar novas políticas, procedimentos operacionais, estruturas organizacionais, etc., sem comprometer ou atrapalhar as presentes operações;
- testar novos arranjos físicos num processo produtivo, ou novos sistemas de transporte antes do emprego dos recursos na aquisição e/ou implantação dos mesmos;
- testar diversas hipóteses sobre como ou por quê certos fenômenos ocorrem;
- identificar os gargalos de um sistema;
- adquirir compreensão de quais variáveis são mais importantes para o desempenho e como estas variáveis interagem;

Já as desvantagens podem ser resumidas em:

- os resultados são, às vezes, de difícil interpretação, uma vez que o modelo está buscando capturar a aleatoriedade do sistema real;
- os modelos de simulação são *rodados* e não *resolvidos*, não podendo gerar uma solução ótima tal como os modelos analíticos; apenas podem servir de ferramenta para a análise do comportamento de um sistema sob condições específicas.

A simulação emprega basicamente duas formas de abordagem: a discreta e a contínua. Na simulação de eventos

discretos, o sistema pode ser descrito por mudanças de estado que ocorrem em tempos discretos; entre estes tempos, o estado do sistema permanece inalterado. Na simulação de eventos contínuos, o comportamento do sistema é caracterizado por equações de um conjunto de variáveis cujo comportamento dinâmico simula o comportamento observado no mundo real.

Para um sistema de transporte intermodal, emprega-se a simulação de eventos discretos, pois não é possível determinar um conjunto de equações que definam as características e a natureza das operações deste sistema.

Durante o processo de simulação, os objetos ou unidades básicas que estão dentro das fronteiras do sistema são chamadas de entidades. Cada entidade tem várias características que são chamadas de atributos. Estas entidades concorrem pela utilização de recursos e interagem com outras entidades, realizando diversas atividades ou transações. Um processo, por outro lado, é uma sequência de eventos ordenados temporalmente e que abrange diversas atividades. A Figura 2 mostra esquematicamente uma sequência de eventos, que englobam uma atividade e representam um processo.

Para se obter sucesso na aplicação das técnicas de simulação, é apresentada a seguir uma metodologia mais recomendada, racional e consagrada para a modelagem de sistemas logísticos, que parte da completa compreensão do problema até a implementação da solução proposta.

1. *Definição do Problema* - é a etapa onde ocorre uma definição clara das metas do estudo, por que se está estudando este problema, e quais respostas busca-se encontrar;

2. *Planejamento do Projeto* - busca-se, nesta fase, verificar a existência de recursos físicos, humanos e técnicos para a execução do projeto;
3. *Definição do Sistema* - é a etapa onde ocorre uma determinação das fronteiras e das restrições a serem usadas na definição do sistema, e uma investigação como o sistema funciona;
4. *Formulação Conceitual do Modelo* - é uma etapa onde se desenvolve um modelo preliminar de forma gráfica (por exemplo, diagrama de blocos) ou já em um pseudo-código, para definir os componentes, as variáveis e as interações lógicas que constituem o sistema;
5. *Projeto Experimental Preliminar* - consiste na seleção das medidas de eficiência que serão empregadas, os fatores a serem variados, e quais dados precisam ser colhidos do modelo, de que forma, e em que extensão;
6. *Preparação dos Dados de Entrada* - consiste na identificação e coleta dos dados necessários pelo modelo;
7. *Tradução do Modelo* - é a formulação do modelo em uma linguagem de simulação apropriada;
8. *Verificação e Validação* - é uma das etapas essenciais do processo, e que consiste na confirmação de que o modelo opera da forma que o analista pretendia, e que a saída do modelo é confiável e representativa de um sistema real. A verificação busca mostrar que o programa computacional se desempenhou como esperado e pretendido, fornecendo, desta forma, uma correta representação lógica do modelo. A validação, por outro lado, estabelece que o comportamento do modelo representa de forma válida, o sistema do mundo real que está sendo simulado.
9. *Projeto Final Experimental* - consiste em projetar experimentos que irão gerar as informações desejadas, e

determinar como cada uma das "corridas" especificadas no projeto serão executadas;

10. *Experimentações* - consiste em executar a simulação para gerar os dados desejados, e realizar análises de sensibilidades;
11. *Análise e Interpretação* - consiste em realizar inferências sobre os dados obtidos pela simulação;
12. *Implementação e Documentação* - é a disponibilização e aplicação dos dados utilizados e dos resultados obtidos, além de uma documentação do modelo e de seu uso.

Para a caracterização do modelo proposto, serão necessários conhecer a demanda de uma carga (origem, destino, volumes, etc.), os pontos de transbordo, as características operacionais de cada modal, e os parâmetros de custo envolvidos. Com os dados de saída da simulação será possível dimensionar o sistema desejado, chegando-se a uma configuração de frota de caminhões, de comboios fluviais e de composições ferroviárias, além da capacidade de estocagem nos terminais.

Associado ao dimensionamento realístico do sistema de transporte, será computado o custo de transporte associado à solução obtida, pois soluções operacionalmente viáveis nem sempre poderão ser economicamente viáveis. Trata-se de um binômio que deverá ter uma solução otimizada em função dos recursos disponíveis por uma empresa de transporte.

Poderão também ser realizadas análises de sensibilidade com a finalidade de verificar o peso de cada parâmetro no sistema, e qual o efeito da variação de cada parâmetro sobre o custo de transporte e sobre a quantidade total transportada. Outrossim, poderão ser testadas diferentes configurações para este sistema, variando-se os parâmetros:

- velocidade das frotas rodoviária, hidroviária, e ferroviária;
- capacidade de carga dos veículos rodoviário, hidroviário, e ferroviário;
- existência ou não de silos/tanques nos terminais;
- taxas de transbordo nos terminais;
- capacidade de armazenagem dos silos/tanques;
- comboios operando com ou sem desmembramento nos terminais;
- comboios com 2 ou 4 chatas (os comboios duplos, com 4 chatas, têm de realizar operação de desmembramento nas eclusas);
- faixa horária de operação das eclusas;
- existência ou não de carga de retorno.

O modelo também permitirá que, uma vez chegada à melhor solução, o custo de transporte seja recalculado quando houver qualquer variação de algum de seus insumos.

3. DESCRIÇÃO DOS SUBSISTEMAS

O modelo econômico-operacional foi estruturado de forma a ser o mais genérico possível, possibilitando a montagem de diversos cenários, de acordo com o sistema de transporte em estudo. Desta forma, pode-se compor um sistema intermodal de transporte através de subsistemas distintos, tais como os subsistemas rodoviário, ferroviário, hidroviário (com a possível presença de eclusas), os terminais rodo-hidroviário, rodo-ferroviário, ferro-hidroviário ou até mesmo rodo-ferro-hidroviário. Estes cenários estarão devidamente caracterizados pelos parâmetros operacionais e de custos.

Portanto, a abordagem sistêmica para este problema se fez necessária para permitir a flexibilidade deste modelo. Além disso, a abordagem sistêmica foi utilizada, pois em sistemas intermodais desta natureza, a

otimização dos subsistemas pode não levar a uma otimização do sistema global devido às interações existentes entre as partes.

Para o caso exemplo que será mostrado, estará sendo simulado o escoamento de soja vindo da região Centro-Oeste do Brasil, com destino ao Porto de Santos para exportação. Esta commodity agrícola estará sendo transportada desde as fazendas produtoras da região até um terminal intermodal no extremo norte da Hidrovia Tietê-Paraná, na cidade de São Simão (GO), através do modal rodoviário. A partir de São Simão, esta carga será embarcada em comboios de empurra formado por um empurrador e duas chatas, com capacidade total de 2400 ton. Estas embarcações deverão percorrer o tramo norte e o tramo Tietê da hidrovia, passando pelos rios Paranaíba, Paraná, São José dos Dourados, Canal de Pereira Barreto e o rio Tietê (com a transposição das eclusas de Nova Avanhandava, Promissão, Ibitinga e Bariri) com destino à cidade de Pederneiras (SP). Nesta cidade a carga estará sendo descarregada em um terminal intermodal que realiza a conexão hidro-ferroviária. Ambos os terminais (São Simão/Pederneiras) são dotados de silos com capacidade pulmão de armazenagem de respectivamente, 60.000 ton e 18.000 ton. A partir de Pederneiras, a carga estará sendo transportada por ferrovias da FEPASA com destino a Santos. O período simulado é um período de 6 meses (fevereiro a julho), correspondente a uma safra de soja, com uma demanda média mensal de 18.000 ton.

Os aspectos econômicos/operacionais contemplados pelo modelo serão detalhados a seguir.

3.1. Subsistema Rodoviário

Este subsistema caracteriza-se por envolver todos os aspectos relativos ao deslocamento do caminhão desde o seu

local de carregamento até a sua chegada ao terminal rodo-hidroviário. Compreende o carregamento da soja, o deslocamento em estradas vicinais próximas ao local de carregamento, o deslocamento em estradas de rodagem na região, a chegada e o descarregamento em São Simão. A ocorrência ou não de filas será consequência do número de entidades presentes em cada etapa dos processos envolvidos.

Para a caracterização deste subsistema são necessários os seguintes dados operacionais:

- distância média percorrida (km)
- velocidade média do veículo (km/h)
- distribuição de probabilidades das capacidades dos veículos (prob. x ton)
- taxas de carregamento (ton/h)
- taxas de descarregamento no terminal rodo-hidroviário (ton/h)
- fator de correção da velocidade para o veículo vazio

Quanto ao cômputo do custo de transporte são necessários os seguintes parâmetros:

- custo do veículo (R\$)
- fração do preço de sucateamento/preço do veículo novo
- taxa de juros anual efetiva (%)
- período de financiamento dos veículos (anos)
- período de carência dos veículos (anos)
- impostos a pagar (R\$)
- IPVA (R\$)
- seguro obrigatório / licenciamento (R\$)
- porcentagem de encargos sociais e obrig. trab. sobre salário direto
- número de motoristas por veículo
- custo médio diário de alimentação (R\$)
- preço do combustível (R\$/litro)
- preço do óleo do motor (R\$/litro)
- consumo de combustível (litros/km)
- consumo de óleo do motor (litros/km)
- porcentagem sobre valor do veículo novo p/calc. da manutenção e reparos

- número de pedágios por viagem redonda
- tarifa do pedágio (R\$)
- preço do pneu novo (R\$)
- quantidade de pneus
- vida útil do pneu (km)
- porcentagem do custo total para cálculo do custo de administração
- porcentagem do custo total para cálculo do custo comercial
- porcentagem do custo total para cálculo do custo de agenciamento
- seguro da carga (R\$)
- horas úteis por dia (horas)
- ano operacional (dias)

3.2. Subsistema Ferroviário

Este subsistema compreende os aspectos relativos ao carregamento dos grãos em vagões graneleiros no terminal intermodal de Pederneiras (transbordo, deslocamentos dos conjunto de vagões nas baias ferroviárias, manobras e montagem da composição). Além disso, este subsistema simula o deslocamento até Santos e o descarregamento da composição. Novamente as filas são consequência do congestionamento natural da operação deste modal.

Para a caracterização deste subsistema são necessários os seguintes dados operacionais:

- distância média percorrida (km)
- velocidade média da composição ferroviária (km/h)
- capacidade média dos vagões (ton)
- número médio de vagões por composição
- taxas de carregamento no terminal hidro-ferroviário (ton/h)
- taxas de descarregamento (ton/h)

Cumpra-se observar que, como no caso das ferrovias paulistas o controle da operação é realizado pela FEPASA, não faz sentido calcular os tempos em cada processo do transporte, com a finalidade de se levantar

os tempos de ciclos de viagem das composições. Adota-se, neste caso, a frequência com que os trens são disponibilizados pela FEPASA à empresa, para o escoamento de sua carga. O modelo permite contudo, optar entre as duas formas: 1) simular as disponibilizações por parte da operadora, ou 2) simular e controlar as viagens redondas.

Da mesma forma, serão indicados os elementos que compõem uma planilha de custos de transporte ferroviário, cumprindo destacar que pode ser adotado, alternativamente, um valor padrão de frete (R\$/tku) semelhante ao praticado nas ferrovias paulistas.

- custo da locomotiva (R\$)
- custo do vagão (R\$)
- fração: preço de sucateamento/preço da locomotiva nova
- fração: preço de sucateamento/preço do vagão novo
- taxa de juros anual efetiva (%)
- período de financiamento das composições ferroviárias (anos)
- período de carência das composições ferroviárias (anos)
- impostos a pagar (R\$)
- porcentagem de encargos sociais e obrig. trab. sobre salário direto
- número de tripulações completas
- custo médio diário de alimentação (R\$)
- preço do combustível (R\$/litro)
- porcentagem sobre custo do combustível p/cálculo do custo de lubrificante
- consumo específico de combustível
- porcentagem de tempo MCP liguado/TVR
- porcentagem sobre valor da locomotiva nova p/cálc. do seguro da locomotiva
- porcentagem sobre valor do vagão novo p/cálc. do seguro do vagão
- porcentagem sobre valor da locom. nova p/cálc. da manutenção/reparos
- porcentagem sobre valor do vagão novo p/cálc. da manutenção/reparos

- porcentagem do custo total para cálculo do custo de administração
- porcentagem do custo total para cálculo do custo comercial
- porcentagem do custo total para cálculo do custo de agenciamento
- seguro da carga (R\$)

3.3. *Subsistema Hidroviário*

Este subsistema compreende a operação de carregamento no terminal de origem em São Simão-GO, a viagem pelas vias navegáveis, e o descarregamento no terminal de Pederneiras. A viagem compreende a passagem pelos rios Paraníba, Paraná, São José dos Dourados, Canal de Pereira Barreto, e o rio Tietê. Neste último também ocorrem as passagens pelas eclusas de Nova Avanhandava, Promissão, Ibitinga e Bariri. O subsistema eclusa será descrito com mais detalhe adiante.

Analogamente aos outros modais, serão listados os parâmetros que caracterizam este subsistema:

- distância média percorrida (km)
- número de comboios
- número de chatas por comboio
- velocidade média dos comboios (km/h)
- capacidade média das chatas (ton)
- taxas de carregamento no terminal hidro-ferroviário (ton/h)
- taxas de descarregamento (ton/h)
- fator de correção da velocidade para o comboio vazio
- se a embarcação realiza eclusagem 24horas/dia ou não

Quanto aos parâmetros de custos:

- custo do empurrador (R\$)
- custo da chata (R\$)
- fração: preço de sucateamento/preço do empurrador novo
- fração: preço de sucateamento/preço da chata nova
- taxa de juros anual efetiva (%)
- período de financiamento das embarcações (anos)

- período de carência das embarcações (anos)
- impostos a pagar (R\$)
- taxa de eclusagem (R\$/ton)
- número de eclusagens por viagem redonda
- porcentagem de encargos sociais e obrig. trab. sobre salário direto
- número de tripulações completas
- custo médio diário de alimentação (R\$)
- custo mensal de material de bordo para os empurradores (R\$)
- preço do combustível (R\$/litro)
- porcentagem sobre custo do comb. p/cálc. do custo de lubrificante
- consumo específico de combustível do MCP (litro/BHP/h)
- consumo específico de combustível dos MCA (litro/BHP/h)
- porcentagem de tempo MCP liguado/TVR
- porcentagem de tempo MCA liguado/TVR
- porcentagem sobre valor do empurrador novo p/cálculo do seguro do empurrador
- porcentagem sobre valor da chata nova p/cálculo do seguro da chata
- porcentagem sobre valor do emp. novo p/cálculo da manutenção/reparos
- porcentagem sobre valor da chata nova p/cálculo da manutenção/reparos
- porcentagem sobre valor do emp. novo p/cálculo da docagem
- porcentagem sobre valor da chata nova p/cálculo da docagem
- porcentagem do custo total para cálculo do custo de administração
- seguro da carga (R\$)

3.4. *Subsistema Terminal*

O subsistema terminal está na interface entre os modais rodo-hidroviário e hidro-ferroviário. O mesmo não tem por função reter as cargas por um grande período de tempo, mas sim de criar condições para que a não simultaneidade temporal das ofertas de veículos transportadores não inviabilize as operações e também para que

acumule-se volume compatível com o transporte por modais como o ferroviário e o hidroviário, sem reter demasiadamente as composições.

A sua operação se dá conforme as regras a seguir:

Terminal de origem - São Simão

a) Interface rodoviária

- ao chegarem no terminal, os caminhões entram em fila para pesagem;
- após a pesagem, se deslocam para o local de transbordo;
- se houver espaço disponível no silo, o descarregamento é efetuado;
- após o descarregamento, os veículos se direcionam novamente para a balança;
- após a nova pesagem, aguardam em uma área apropriada próximo à balança para a liberação final;

b) Interface hidroviária

- após a chegada do comboio e a sua atracação, inicia-se o posicionamento das chatas junto ao ponto de carregamento (shiploader);
- se acabar a carga disponível no silo, o carregamento é suspenso até que a carga seja reposta até um certo nível mínimo (por exemplo, 100 ton). Esta premissa foi adotada pelo fato da taxa de descarregamento do silo ser superior à taxa de carregamento, e conseqüentemente, pelo fato de haver a necessidade de um estoque mínimo que justifique a operação de todos os equipamentos;
- após o enchimento de uma chata, a mesma é posicionada próximo ao cais em local adequado, e o processo de carregamento do comboio segue normalmente;
- após o término de carregamento de todo o comboio, o conjunto é acoplado e o comboio segue viagem;
- na eventualidade de ocorrência de chuvas durante o carregamento, o

processo é interrompido para a garantia da qualidade da carga.

Terminal de destino - Pederneiras

a) Interface hidroviária

- após a chegada do comboio e a sua atracação, inicia-se o posicionamento das chatas junto ao ponto de descarregamento (sugadores);
- se durante o descarregamento das chatas acabar o espaço disponível no silo, o mesmo será suspenso durante o tempo necessário para que a carga seja escoada via ferrovia, até que se libere um espaço equivalente a 5% da capacidade do silo. Este valor arbitrado de 5% foi estipulado pelo fato da taxa de carregamento do silo ser superior à taxa de descarregamento, e conseqüentemente, pelo fato de haver a necessidade de um espaço mínimo que justifique a operação de todos os equipamentos;
- após o esvaziamento de uma chata, a mesma é posicionada próximo ao cais em local adequado, e o processo de descarregamento do comboio segue normalmente;
- após o término de descarregamento de todo o comboio, o conjunto é acoplado e o comboio segue viagem;
- na eventualidade de ocorrência de chuvas durante o descarregamento, o processo é interrompido para que não deteriore a carga.

b) Interface ferroviária

- ao chegar no terminal, os vagões aguardam em fila o carregamento;
- nesta operação, um conjunto de vagões são deslocados em bloco para pesarem vazios, carregarem e pesarem cheios novamente;
- os vagões já carregados aguardam em local apropriado pelos demais;
- após todos os conjuntos de vagões estarem carregados, monta-se a

oposto em que se encontra a embarcação;

- a eclusa está ocupada, com uma eclusagem sendo feita para o nível oposto em que se encontra a embarcação, e há uma fila no lado oposto.

Em todos os casos, quando houver a necessidade de se esperar em fila, seja para a transposição, ou durante a noite, a embarcação aguarda em um local apropriado.

Os tempos envolvidos nos processos de eclusagem são divididos em:

- tempo de acesso longo - é o tempo de deslocamento da embarcação entre o ponto de parada obrigatório e o ponto de entrada da câmara da eclusa;
- tempo de acesso curto - é o tempo de deslocamento da embarcação desde o ponto de entrada da câmara da eclusa até a que a mesma adentre por completo a câmara;
- tempo de viragem - é o tempo que leva para encher ou esvaziar a câmara da eclusa quando a mesma está vazia, para posicionamento em outro nível;
- tempo de eclusagem - é o tempo de transposição propriamente dito;
- tempo de saída - é o tempo de saída da embarcação da câmara.

A inserção da eclusa num contexto de simulação permite através análise da porcentagem média de ocupação da mesma, concluir se a intensidade do tráfego na hidrovia está simulando condições reais de operação ou não. Por exemplo, se o índice de congestionamento da eclusa estiver baixo, então novas embarcações de "terceiros" são inseridas no modelo, para representar o congestionamento real.

Estas embarcações têm suas posições iniciais sorteadas de tal forma as mesmas

estejam uniformemente distribuídas ao longo do rio.

4. SIMULAÇÃO DO SISTEMA INTEGRADO DE TRANSPORTE

A modelagem do problema proposto foi implementada de duas maneiras: a parte de custos foi implementada em planilhas Excel, e a modelagem operacional em um software de simulação probabilística - ARENA.

Serão enfatizados neste trabalho a modelagem operacional, considerando o item de custos como uma manipulação algébrica dos parâmetros apontados anteriormente. Cumpre destacar que todos os parâmetros temporais para cálculo dos respectivos custos de transporte, foram extraídos do processo de simulação. Desta forma, após cada "corrida" do modelo, a planilha de custos deve ser recalculada em função do cenário em questão.

O modelo operacional, conforme mencionado, foi desenvolvido em linguagem ARENA. Com o desenvolvimento da capacidade de processamento, interface gráfica e a disseminação do emprego recursos computacionais na indústria, os softwares de simulação vêm se tornando cada vez mais utilizados, proporcionando a racionalização da operação e a melhoria do desempenho de complexos sistemas de logísticos e de transportes.

O ARENA possui entre outras características as listadas abaixo:

- um módulo de análise de dados, o qual permite realizar testes de aderência dos dados de entrada do problema, a fim de determinar a distribuição estatística que melhor representa o sistema real;

- um módulo de análise dos dados de saída da simulação que permite comparar as corridas de diferentes replicações através de gráficos e a construção de intervalos de confiança;
- uma linguagem de programação baseada em diagrama de blocos que facilita a codificação do modelo;
- uma interface gráfica de animação que permite o acompanhamento de cada passa do modelo em tempo real, auxiliando a sua compreensão e sua verificação.

Exemplificando o sistema intermodal, serão mostrados algumas telas do modelo desenvolvido. Em primeiro lugar, será mostrado a Figura 3, que representa a modelagem de uma eclusa. As etapas de definição do problema e estruturação lógica foram feitas a partir de estudos da bibliografia técnica, visitas e acompanhamento do processo de eclusagem em todas as eclusas do rio Tietê, e de entrevistas com técnicos da CESP.

Para realizar o processo de verificação utilizou-se do recurso de animação gráfica para indicar a seqüência lógica da operação. Esta etapa englobou a simulação com diversas condições de taxas de chegada à eclusa, para que todas as situações possíveis (comentadas na descrição do subsistema eclusa) fossem testadas. Quanto à validação, coletou-se os tempos envolvidos de cada um dos testes feitos, analisando-se a coerência destes valores em relação aos tempos que seriam reais numa operação de eclusagem.

Analogamente, para cada subsistema do modelo proposto foram realizados os mesmos procedimentos, de forma a garantir a confiabilidade e a representatividade do modelo desenvolvido.

Nas figuras em anexo tem-se ainda uma tela de animação do sistema com o mapa da Hidrovia Tietê-Paraná (Figura 4). Em seguida tem-se uma tela indicativa do número total de embarcações por trecho hidroviário (onde se inclui a frota da empresa operante e as demais embarcações que estão navegando pela hidrovia), que possibilita uma análise do tráfego existente (Figura 5). Há também, um gráfico indicativo do nível de silagem em São Simão e em Pederneiras com de duas curvas sobrepostas: o estoque instantâneo e o estoque médio, ao longo do tempo (Figura 6) e uma tela de definição de algumas estatísticas do modelo (Figura 7).

5. EXPERIMENTO E RESULTADOS

Para a exemplificação da metodologia desenvolvida, foi simulado o sistema indicado na seção 3, com algumas simplificações.

Por exemplo, o modal rodoviário foi simulado supondo uma frota spot para o transporte de soja das fazendas produtoras até o terminal rodo-hidroviário. Como o objetivo deste exemplo é mostrar a dificuldade no balanceamento do fluxo da carga entre os modais, e não o dimensionamento das frotas propriamente dito, o modelo estará assumindo uma taxa de chegada dos caminhões ao terminal segundo uma distribuição exponencial, ao invés de estar controlando o ciclo de viagem completo por caminhão. A distribuição utilizada é representativa de um processo de chegada de eventos independentes.

Já para o modal hidroviário, as viagens estarão sendo simuladas por completo (ida, volta e transbordo), pois o número de embarcações é fixo, e o desempenho

operacional das mesmas influenciarão no atendimento ou não da demanda prevista de transporte.

Para o caso ferroviário, conforme já mencionado na seção 3, será feita uma simulação levando em conta a frequência com as composições são disponibilizadas pela FEPASA junto ao terminal ferro-hidroviário.

Os terminais estarão operando 24 horas e a incidência de paradas devido a chuvas na região será omitida.

As eclusas terão o seu horário de funcionamento condicionados pelo tipo de embarcação da seguinte forma:

- embarcação de carga não perigosa - 6:00 hs às 22:00 hs
- embarcação de carga perigosa - 7:00 hs às 19:00 hs
- embarcação de passageiros - 24 horas

OBS:

1. As embarcações da frota "própria" simuladas estarão na primeira classe acima;
2. Os horários acima indicam a flexibilidade do modelo de lidar com janelas de tempo de atendimento de embarcações na eclusa, e podem, eventualmente, estar diferentes da realidade atual.

Os parâmetros utilizados na simulação foram os seguintes:

Modal Rodoviário

- intervalo de chegada dos caminhões ao terminal: distribuição exponencial, com média 40 ou 60 min (os 2 valores serão testados);

Terminal Rodo-Hidroviário:

- capacidade máxima de estocagem: 60.000 ton;
- estoque no início da simulação: 8.000 ton;
- horário de operação: 24 horas;

Modal Hidroviário:

- número de comboios: 3;
- número de chatas por comboio: 2;
- capacidade de carga por chata: 1200 ton;
- velocidade média das embarcações: 12 km/h;
- horário de funcionamento da eclusa: 16 horas x 24 horas (os 2 valores serão testados);

Terminal Hidro-Ferroviário:

- capacidade máxima de estocagem: 18.000 ton;
- estoque no início da simulação: 1.000 ton;
- horário de operação: 24 horas;

Modal Ferroviário:

- intervalo de chegada dos trens ao terminal: distribuição normal, com média 2, 2.5, ou 3 dias (os 3 valores serão testados), e coeficiente de variação 10%;

Buscou-se, através da variação dos parâmetros acima, saber a influência no fluxo/balanceamento dos modais. A Tabela 1 indica os experimentos realizados e os resultados obtidos.

Em relação aos custos, adotou-se apenas para exemplificação da metodologia proposta, os seguintes valores:

- frete rodoviário - R\$ 13,00/ton;
- frete hidroviário - R\$ 9,50/ton;
- frete ferroviário - R\$ 12,00/ton;
- transbordos - R\$ 3,5/ton;

Estes valores foram estimados a partir dos parâmetros levantados na planilha de

custo. Com estes dados, foi calculado para cada cenário a conta total de fretes, que é função da carga total transportada no período de seis meses (Tabela 2). A praticidade e a importância da metodologia proposta pôde ser comprovada pela integração entre os arquivos de dados de saída da simulação e o arquivo que continha as planilhas de custo.

Cabe ressaltar que a solução tida como a melhor, dentro da faixa restrita de testes realizados, balanceou satisfatoriamente a demanda (18.000 ton/mês) entre os três modais e proporcionou a menor conta de fretes. Outro aspecto operacional importante foi a inexistência de tempo de fila para carregamento dos trens.

A metodologia desenvolvida permite a variação de um número ilimitado de parâmetros. Como restrição a um número grande de graus de liberdade está o elevado tempo de processamento computacional, pois para cada cenário, deverão ser feitas múltiplas corridas independentes para que os dados obtidos sejam estatisticamente representativos. Portanto, os cenários ou parâmetros dos testes deverão ser escolhidos criteriosamente, de forma a viabilizar a execução dos mesmos.

Outrossim, os experimentos acima executados visam apenas ilustrar o potencial da metodologia, e não ditar regras ou parâmetros para o dimensionamento "otimizado" deste sistema mostrado.

JPEN XV COPINAYAL Meeting
Montevideo - Uruguay
11 - 14 Nov. 1997

6. CONCLUSÕES E EXTENSÕES

O modelo econômico-operacional permite dimensionar de forma realista e estratégica um sistema intermodal de transportes, levando em consideração todos os aspectos operacionais relevantes.

As planilhas de custos associadas, possibilitam conhecer os itens de maior peso para o cômputo dos fretes. Além disso permitem relacionar os diversos cenários de operação aos custos de transporte.

A continuidade desta pesquisa visa implantar as rotinas necessárias para que, acoplado ao dimensionamento completo do sistema por simulação, encontre-se uma solução de custo mínimo de transporte e que atenda à demanda.

7. BIBLIOGRAFIA

Azevedo, C. (1979) - Transporte Rodoviário de Cargas, Custos e Tarifação, Euler S.A. Engenharia e Consultoria, Rio de Janeiro.

Botter, R.C. e Souza, R. L. (1996) - Analysis and Design of an Ocean Transportation System Using Simulation Techiques, 14o. Triennial Conference - IFORS 96 - The International Federation of Operational Research Societies, Vancouver, Canadá.

Botter, R.C., Roque, J.R.R.; Gouvêa, M.T. e Souza, C.L.P. (1991) - Dimensionamento de um Sistema Integrado de Transporte de Álcool e Óleo Diesel na Região de Influência da Hidrovia Tietê-Paraná, Revista "Cadernos de Tecnologia", nr. 1, pág. 11-26, Centro Estadual de Educação Tecnológica "Paula Souza".

Brinati, M. A. (1983) - Influência das Condições de Operação Portuária sobre o Dimensionamento de Comboios Fluviais, VIII Congresso Pan-Americano de Engenharia Naval, Transportes Marítimos e Engenharia, Washington, D.C., EUA.

Brinati, M. A., Tonon, V. J. e Ramalho, E. W. (1981) - Determinação dos Tempos de Espera e Transposição de uma Eclusa, VII Congresso Pan-Americano de Engenharia Naval, Transportes Marítimos e Engenharia Portuária, Chile.

Lima Jr., O. F. (1988) - Metodologia para concepção e dimensionamento de terminais multimodais de pequeno e médio porte. São Paulo. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da USP.

Lucci, M.A.S. (1990) - Tarificação Ferroviária, Análise e Proposições de Reformulação, Rio de Janeiro. Dissertação (Mestrado) - Instituto Militar de Engenharia.

Mumayiz, S. A (1992) - Overview of Airport Simulation Models - Transportation Research Record, 1273.

Novaes, A. G. (1978) - Custos e Características Operacionais do Transporte Hidroviário, São Paulo, TRANSESP.

Pedgen, C. D. et alii (1995) - Introduction to Simulation Using SIMAN, McGraw-Hill.

Pidd, M. (1992) - Computer Simulation in Management Sciences, John Wiley & Sons.

Reinig, W.A. (1994) - Hidrovia Tietê-Paraná: Apresentação de Parâmetros Básicos para Comparação Indicativa entre os Modais Hidroviário x Ferroviário x Rodoviário, São Paulo, CESP, (Série Pesquisa e Desenvolvimento 115).

Tabela 1 - Experimentos e Resultados Obtidos

Parâmetros					Resultados												
Modal Rodoviário	Modal Ferroviário	Modal Hidroviário			Terminal Origem	Modal Rodoviário			Terminal Destino	Modal Hidroviário					Modal Ferroviário		
Intervalo de chegada (minutos)	Intervalo de chegada (dias)	Eclusagem 16horas/ 24horas	Velocidade média (km/h)	Capacidade do comboio (ton)	Estoque médio (ton)	Tempo fila descarga (min)	Núm. viagens	Carga transp. (ton)	Estoque médio (ton)	Tempo em fila p/ carregar (min)	Tempo em fila p/ descarga (min)	Tempo de viagem redonda (min)	Núm. viagens	Carga transp. (ton)	Tempo em fila p/ carregar (min)	Núm. viagens	Carga transp. (ton)
40	2.0	16	12	2400	6155.9	1.1	6426	160650	15993.1	21.9	741.3	12365.8	64	151200	0.0	91	136500
40	2.0	24	12	2400	7088.6	1.0	6420	160500	16830.3	485.3	2697.3	15665.4	50	150000	0.0	90	135000
40	2.5	16	12	2400	18441.3	1.0	6465	161625	17174.8	163.1	4384.0	18908.8	42	123000	0.0	72	108000
40	2.5	24	12	2400	20531.4	1.1	6612	165300	17284.6	236.3	5040.4	18905.3	42	126000	0.0	73	109500
40	3.0	16	12	2400	25583.5	1.0	6335	158375	17365.0	58.4	6503.3	21928.6	36	108000	0.0	61	91500
40	3.0	24	12	2400	26262.6	9.0	6393	159825	17362.8	256.0	6728.2	21888.4	36	108000	0.0	61	91500
60	2.0	16	12	2400	165.3	0.6	4337	108425	2433.8	5260.7	7.7	19658.1	38	120000	6149.4	80	120000
60	2.0	24	12	2400	147.6	0.7	4271	106775	2403.7	6409.3	7.7	19997.0	38	117000	7129.2	78	117000
60	2.5	16	12	2400	173.6	0.7	4258	106450	11299.1	5684.0	13.1	20048.8	38	117000	0.0	72	108000
60	2.5	24	12	2400	149.3	0.7	4320	108000	10594.7	6212.7	7.7	19752.7	38	120000	0.0	73	109500
60	3.0	16	12	2400	2069.3	0.7	4232	105800	16572.3	2150.3	3569.9	22470.7	36	105000	0	60	90000
60	3.0	24	12	2400	1793.1	0.7	4290	107250	16398.8	2762.8	3382.1	22197.2	36	105000	0	60	90000

00015

Tabela 2 - Frete Total no Período

Total de carga transportada (ton)			Total de frete pago (R\$)				Total (R\$)
Rodovia	Ferrovia	Hidrovia	Rodovia	Ferrovia	Hidrovia	Transbordo	
160.650	136.500	151.200	2.088.450,00	1.638.000,00	1.436.400,00	524.606,25	5.687.456,25
160.500	135.000	150.000	2.086.500,00	1.620.000,00	1.425.000,00	521.062,50	5.652.562,50
161.625	108.000	123.000	2.101.125,00	1.296.000,00	1.168.500,00	451.171,88	5.016.796,88
165.300	109.500	126.000	2.148.900,00	1.314.000,00	1.197.000,00	460.950,00	5.120.850,00
158.375	91.500	108.000	2.058.875,00	1.098.000,00	1.026.000,00	407.640,63	4.590.515,63
159.825	91.500	108.000	2.077.725,00	1.098.000,00	1.026.000,00	408.909,38	4.610.634,38
108.425	120.000	120.000	1.409.525,00	1.440.000,00	1.140.000,00	409.871,88	4.399.396,88
106.775	117.000	117.000	1.388.075,00	1.404.000,00	1.111.500,00	400.553,13	4.304.128,13
106.450	108.000	117.000	1.383.850,00	1.296.000,00	1.111.500,00	392.393,75	4.183.743,75
108.000	109.500	120.000	1.404.000,00	1.314.000,00	1.140.000,00	400.312,50	4.258.312,50
105.800	90.000	105.000	1.375.400,00	1.080.000,00	997.500,00	355.075,00	3.807.975,00
107.250	90.000	105.000	1.394.250,00	1.080.000,00	997.500,00	356.343,75	3.828.093,75

Figura 1 - Experimentos Utilizando a Simulação

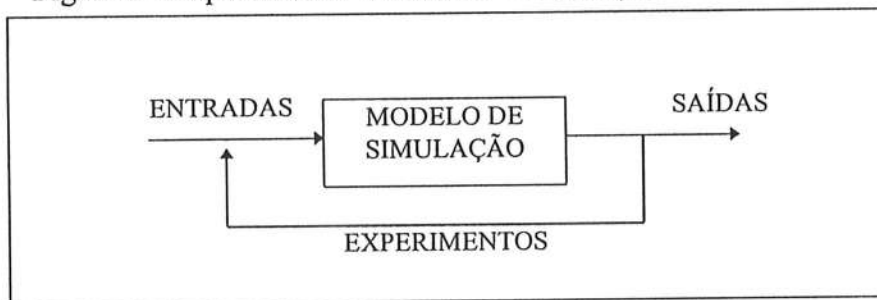


Figura 2 - Modelagem de Eventos Discretos



Figura 3 - Modelagem em Arena de uma Eclusa

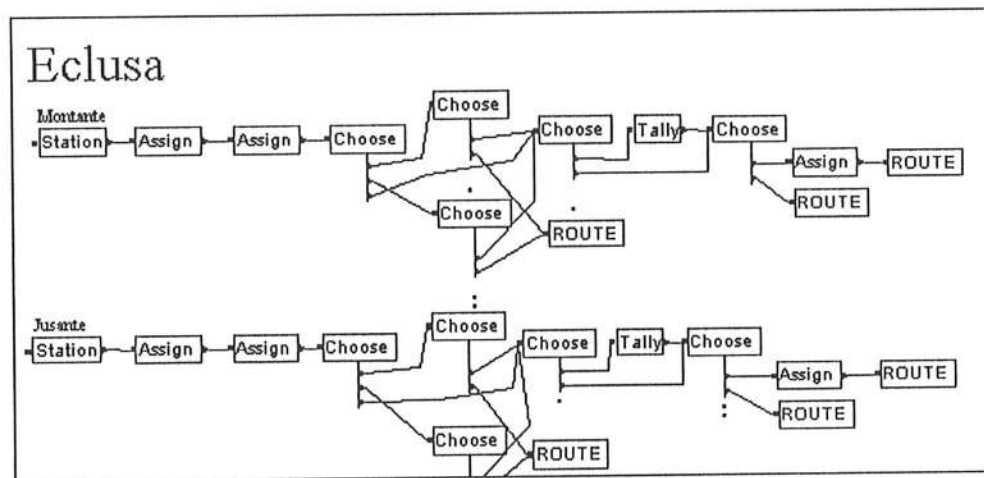
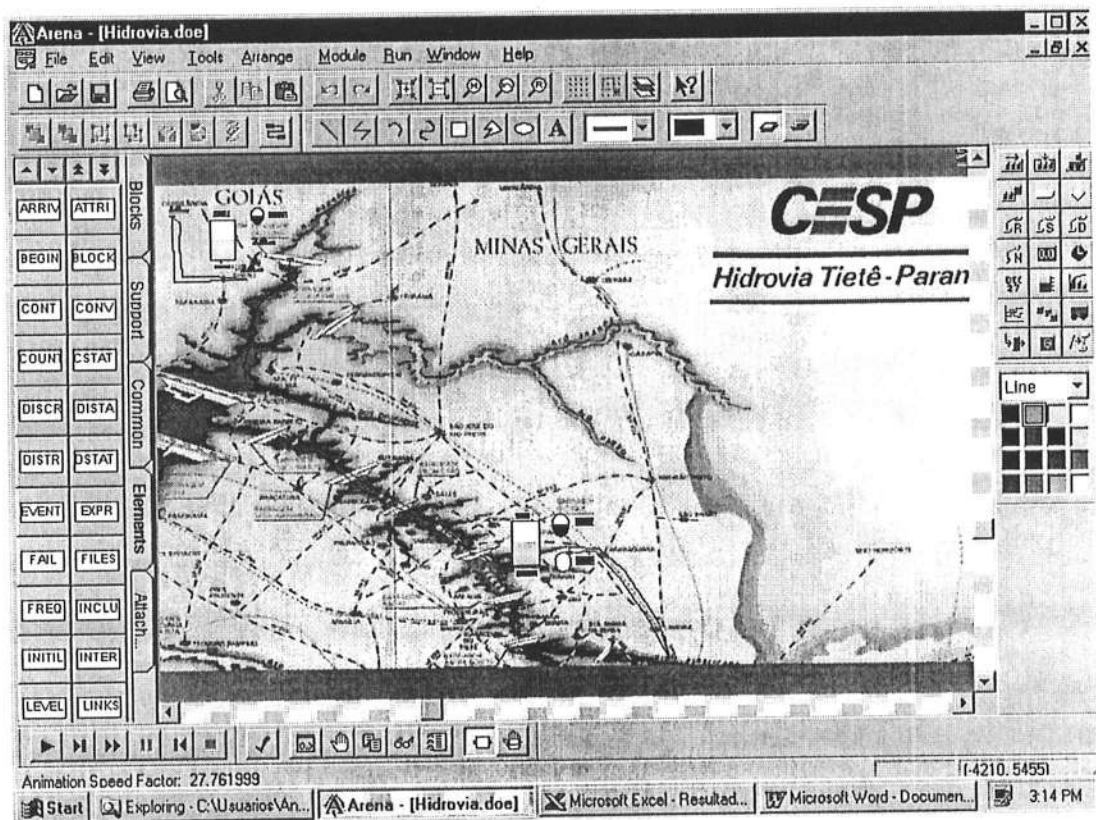


Figura 4 - Tela de Animação do Modelo



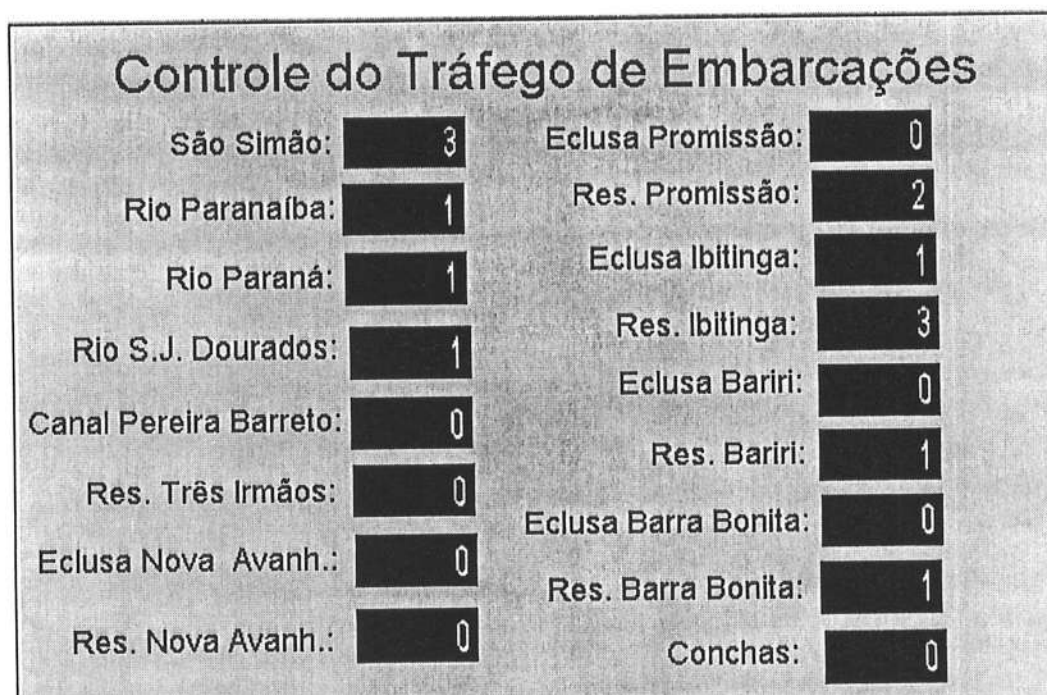


Figura 5 - Controle do Tráfego de Embarcações

Figura 6 - Estoque nos Armazéns de São Simão e Pederneiras

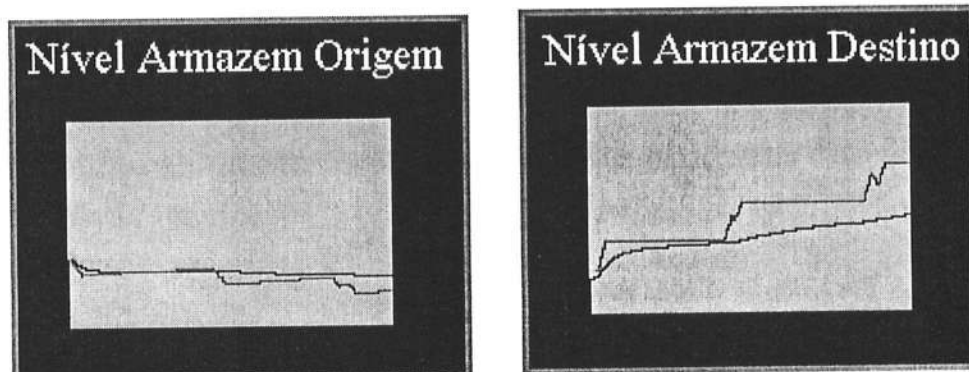


Figura 7 - Tela de Definição de Algumas Estatísticas

Estatísticas		
DSTATS NQ(fem_barra_bonita) NQ(fem_barri) NQ(fem_ibitinga) NQ(fem_promissao) NQ(fem_hova_avanhandava)	DSTATS NQ(fej_barra_bonita) NQ(fej_barri) NQ(fej_ibitinga) NQ(fej_promissao) NQ(fej_hova_avanhandava)	DSTATS NQ(fnm_barra_bonita) NQ(fnm_barri) NQ(fnm_ibitinga) NQ(fnm_promissao) NQ(fnm_hova_avanhandava)
DSTATS NQ(fnj_barra_bonita) NQ(fnj_barri) NQ(fnj_ibitinga) NQ(fnj_promissao) NQ(fnj_hova_avanhandava)	DSTATS NR(eclusa_barra_bonita) NR(eclusa_barri) NR(eclusa_ibitinga) NR(eclusa_promissao) NR(eclusa_hova_avanhandava)	



Otimização do Projeto Estrutural via Algoritmo Genético

*Eng. Sandra Rita de Oliveira
Prof. Dr. Oscar Brito Augusto
Universidade de São Paulo
Depto. de Eng. Naval e Oceânica*

Resumo

Neste trabalho apresenta-se o Algoritmo Genético (AG), um algoritmo de programação matemática não linear, a ser utilizado em projetos otimizados de estruturas navais e oceânicas. O algoritmo foi aplicado ao projeto de uma Tampa de Escotilha e de um Vaso de Pressão. Os valores obtidos foram comparados com os resultados apresentados nos mesmos projetos, através da aplicação de alguns algoritmos consagrados da literatura. Embora os algoritmos utilizados no trabalho comparativo, em sua forma original, tenham sido propostos para operarem com variáveis contínuas, eles foram adaptados para o tratamento de problemas com variáveis discretas, uma vez que nos projetos estruturais em geral, é comum encontrar-se este tipo de variável. Os testes executados mostram o Algoritmo Genético como sendo um eficaz algoritmo exploratório, nas regiões do espaço de busca, devido a sua globalidade e flexibilidade.

Abstract

This work introduces the Genetic Algorithm (GA), a non linear programming algorithm used for the computer aided design of ocean structures. It was used in a Hatch Cover and a Pressure Vessel design. The results were compared to results obtained with some usual algorithms found in technical literature. However, these algorithms, originally, only work with continuous variables, then some improvements were incorporated in order to make possible the operation of discrete variables. The testes shown the Genetic Algorithm as a good algorithm of exploration in the search spaces due to its globality and flexibility.

1. Introdução

Está muito enraizado na engenharia oceânica, em particular, e na engenharia, em geral, os procedimentos de projeto baseados no método conhecido como *espiral de projeto*, onde os valores a serem definidos para vários parâmetros de projeto são, à princípio, admitidos, com base em experiências passadas, e melhorados,

segundo critérios específicos de performance, através de repetidos exercícios de modificações por tentativa e erro.

Com a introdução de formas estruturais inovadoras e o crescimento da complexidade dos requisitos de projeto, surge a necessidade de novos procedimentos capazes de satisfazer os requisitos de projeto em espaços mais

curtos de tempo. A tendência atual é a de substituir a prática convencional, que depende em larga escala da experiência passada, por um sistema automatizado de projeto no qual o problema em questão é formulado numericamente e, em consequência disto, tratado por técnicas puramente matemáticas, inclusive de otimização.

Estudos de otimização em projetos de estruturas de navios datam dos meados da década de 70 e um certo grau de sucesso tem sido atingido pelos diversos modelos propostos que utilizam principalmente a técnica de minimização seqüencial sem restrições (SUMT), envolvendo principalmente os parâmetros de projeto tratados como variáveis contínuas. No entanto, os parâmetros de projeto são inerentemente discretos - o número de enrijecedores em um painel reforçado do casco de um navio, por exemplo, é, inexoravelmente, uma variável discreta - indicando que uma abordagem mais adequada, para problemas de projeto, deveria ser encontrada na otimização global, permitindo a combinação de variáveis contínuas e discretas.

Devido à constante busca de melhorias das técnicas de projeto, deve ser considerada a possibilidade do uso de ferramentas mais modernas, mais robustas e mais rápidas, baseadas em outros conceitos de otimização. As considerações anteriores estimularam a presente pesquisa de otimização de estruturas de embarcações através do uso do algoritmo genético. Como o nome indica, o algoritmo genético tenta simular, em computador, os processos de evolução observados na natureza.

Esta nova abordagem difere das várias técnicas convencionais de otimização, as quais procuram melhorar sucessivamente, conjunto por conjunto, as variáveis independentes de um problema, gerando uma única solução com ótima

performance, que pode não ser necessariamente o ótimo global. O algoritmo genético objetiva melhorar, em paralelo, um número de conjuntos de variáveis independentes e, deste modo, simultaneamente melhorar os valores estimados de performance para um grupo de soluções.

2. O Algoritmo Genético

Organismos vivos têm a intrínseca capacidade de solucionar problemas. Eles exibem uma versatilidade que deixam o melhor programa de computador envergonhado, conseguindo suas habilidades através de mecanismos, aparentemente indiretos, de evolução e seleção natural.

O algoritmo genético faz com que seja possível explorar a mais ampla gama de soluções potenciais para um problema, de melhor forma que os programas convencionais. Além do mais, como pesquisadores investigam a seleção natural de programas sob controladas e bem entendidas condições, os resultados práticos que eles obtêm podem produzir algum discernimento de detalhes de como a vida e a inteligência evoluem no mundo natural.

A maioria dos organismos evolui principalmente através de dois processos primários: seleção natural e reprodução sexual. O primeiro determina quais membros da população sobrevivem para a reprodução e o segundo, assegura a mistura e a recombinação entre os genes dos seus descendentes. Ocorre a troca de material genético, quando há uma fusão entre o espermatozóide e o óvulo, combinando um cromossomo com outro. A recombinação ou mistura (*crossing over*) permite às criaturas evoluírem muito mais rapidamente do que se cada descendente tivesse uma simples cópia dos genes de um

dos pais, modificado ocasionalmente através de mutação.

As pessoas têm empregado uma combinação de cruzamento e seleção de raças por milênios, para criar melhores colheitas, apurar qualidades em cavalos, produzir flores ornamentais. Contudo, este não é um processo simples para ser traduzido para um programa de computador. O problema chave é a construção de um *código genético* que possa representar a estrutura de diferentes problemas, assim como o DNA representa a estrutura de uma pessoa ou de um rato.

Pode-se neste momento considerar-se uma importante questão:

O que na realidade são os Algoritmos Genéticos?

Os Algoritmos Genéticos são algoritmos de pesquisa baseados nos mecanismos de seleção e genética natural. Eles combinam a sobrevivência do mais apto entre, *indivíduos* ou projetos, caracterizados por estruturas de *strings*, com uma elaborada troca de informação aleatória, para formar um algoritmo de busca com as mesmas habilidades encontradas nos mecanismos da evolução natural. Em cada geração, um novo conjunto de criaturas artificiais (*strings*) é criado com base em subgrupos de melhor performance da geração anterior. Apesar da característica aleatória, algoritmos genéticos não fazem simplesmente uma busca aleatória. Eles eficientemente exploram informações históricas para especular novos pontos de busca com uma já esperada melhora na performance.

Desde a sua criação por Jonh Holland (1975), as principais metas nas pesquisas realizadas com os Algoritmos Genéticos são:

1. Abstrair e explicar rigorosamente os processos adaptativos dos sistemas naturais.

2. Projetar sistemas artificiais, *softwares*, que retenham os importantes mecanismos dos sistemas naturais

Este enfoque tem levado a importantes descobertas nos dois ramos da ciência, natural e artificial.

A questão fundamental no desenvolvimento de algoritmos genéticos tem sido *robustez*, o equilíbrio entre eficiência e eficácia necessária para a sobrevivência nos mais variados meios. As implicações da robustez para sistemas artificiais são múltiplas. Caso os sistemas artificiais possam ser feitos mais robustos, o custo de um novo projeto pode ser reduzido ou eliminado.

Um algoritmo genético simples (AG) e que produz bons resultados em muitos problemas práticos deve ser composto de três operadores básicos: reprodução, *crossover* e mutação.

Reprodução é um processo no qual *strings* individuais são copiados de acordo com os valores da função objetivo, *f* (biólogos chamam esta função de função performance). Copiar *strings* de acordo com seus valores de performance significa que *strings* com melhor performance têm uma maior probabilidade de contribuir com um ou mais descendentes nas próximas gerações. Este operador é uma versão artificial da seleção natural, ou, em outras palavras, ele produz um sobrevivente *Darwiniano* entre os mais aptos *strings*. Em populações naturais o mais apto é determinado pela habilidade da criatura de sobreviver aos seus predadores, pestes e outros obstáculos para atingir a fase adulta e, conseqüentemente, a reprodução. Neste caso, artificial, a função objetivo é o árbitro final que decidirá, de acordo com as suas performances, a “vida ou a morte” das criaturas formadas por *strings*.

Depois da reprodução, segue-se, em dois passos, um simples *crossover*. Primeiro, membros de um *string* recém

reproduzido são cruzados aleatoriamente. Segundo, cada par de *strings* sofre o cruzamento da seguinte forma: seleciona-se, de forma aleatória, uniformemente distribuída, entre 1 e o comprimento do *string* menos 1 $[1, l - 1]$, uma posição k . Dois novos *strings* são criados através da troca de todos os caracteres entre as posições $k + 1$ e l , inclusive. Por exemplo, considere os *strings* A_1 e A_2 seguintes:

$$A_1 = 01 | 110$$

$$A_2 = 11 | 010$$

Suponha-se $k = 2$ o resultado da escolha de um número aleatório entre 1 e 4, (conforme indicado pelo símbolo de separação $|$). Como resultado, o *crossover* produz dois novos *strings* onde o símbolo ($'$) significa que os *strings* são parte de uma nova geração:

$$A'_1 = 01010$$

$$A'_2 = 11110$$

Conforme pode-se notar os mecanismos de reprodução e *crossover* são surpreendentemente simples, envolvendo a geração de números aleatórios, cópias de *strings*, e a troca parcial entre *strings*. Contudo, a ênfase combinada de reprodução e a estruturação, através da aleatoriedade, da troca de informação do *crossover*, dá aos algoritmos genéticos muito do seu poder.

Neste caso então, qual é o objetivo do operador mutação? Sem trazer surpresas, há muita confusão sobre o papel da mutação em genética (tanto natural como artificial), mas qualquer que seja a causa desta confusão, os estudiosos do assunto vêem a mutação como um papel secundário na operação do algoritmo genético. A mutação é necessária, porque mesmo com a reprodução e *crossover*,

efetivamente buscando-se e recombinando-se parte do material, ocasionalmente eles podem se tornar por demais zelosos e perder material genético potencialmente útil (1's ou 0's em uma locação particular de um *string*). Em sistemas genéticos artificiais, o operador mutação protege o algoritmo de uma perda irreversível. No AG, a mutação é, com pequena probabilidade, uma alteração aleatória ocasional do valor de um *bit* em uma dada posição do *string*. Em um código binário, isto simplesmente significa mudar de um 1 para um 0 e vice-versa. A mutação propriamente dito, é uma "caminhada" aleatória no espaço do *string*. Quando escassamente usado, em conjunto, com reprodução e *crossover*, ele é uma medida de segurança contra perdas prematuras de importantes informações.

Outros operadores genéticos e planos reprodutivos têm sido abstraídos do estudo de exemplos biológicos. Contudo, os três operadores examinados (reprodução, *crossover* e mutação) têm provado ser tanto, computacionalmente, simples, quanto efetivo na solução de um grande número de importantes problemas de otimização.

3. Aplicações

Com o objetivo maior de verificar o comportamento do algoritmo em comparação a outros algoritmos tradicionalmente utilizados em otimização, utilizou-se o algoritmo genético na solução dos dois problemas descritos a seguir.

3.1 Tampa de Escotilha

Visando o mínimo peso, deseja-se obter as dimensões h e t_b , mostrados na figura 1, para a tampa de escotilha de porão de carga de uma embarcação. A largura da escotilha é $l_0 = 6.0m$ e a tampa é formada por segmentos de viga caixão,

fabricada em alumínio - módulo de elasticidade $E = 70\text{KN/mm}^2$, tensão de escoamento, $\sigma_e = 70\text{N/mm}^2$, coeficiente de Poisson, $\mu = 0.3$ - e largura de segmento de $b = 600\text{mm}$. A pressão, a ser suportada

$$p = 10\text{KN/m}^2$$

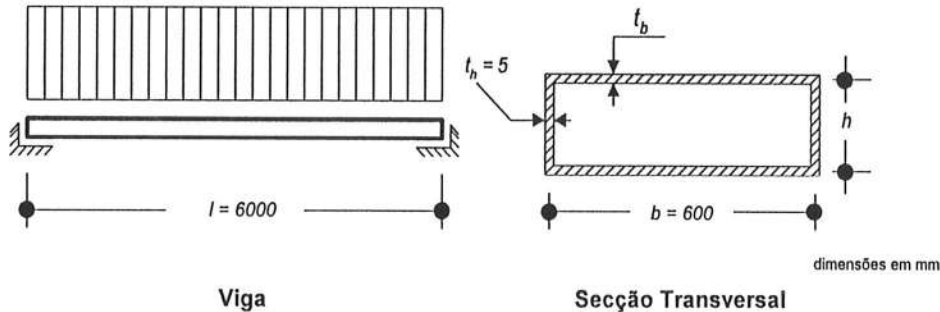


Figura 1 - Segmento de tampa de escotilha

- Máximo deslocamento, $g_1(h, t_b)$:

$$\delta = \frac{5(pbl)^4}{384EI} \leq \delta_{\text{lim}} = \frac{l}{500} = 12.0\text{mm}$$

- resistência nos pontos de máxima sollicitação

flange, fibra externa, $g_2(h, t_b)$:

$$\sigma = \frac{(pb)l^2}{12W} \leq \sigma_{\text{max}} = 70\text{MPa}$$

alma, linha neutra, $g_3(h, t_b)$:

$$\tau = \frac{\left(\frac{pbl}{2}\right)_m}{t_h I} \leq \tau_{\text{max}} = \frac{70}{\sqrt{3}}\text{MPa}$$

- não ocorrência de flambagem localizada dos flanges, $g_4(h, t_b)$:

$$\frac{b}{t_b} \leq \frac{4\pi}{\sqrt{12(1-\mu^2)}} \sqrt{\frac{E}{\sigma}}$$

Dados geométricos:

- Área: $A = 2(ht_h + bt_b)$
- Inércia: $I = (t_h h + 3t_b b) \frac{h^2}{6}$

pela escotilha, é de $p = 10\text{KN/m}^2$. Devem ser verificadas as restrições, a seguir, mencionadas.

- Módulo de resistência: $w = 2 \frac{I}{h}$
- Momento estático na linha neutra: $m = \frac{1}{4}bt_b h + \frac{1}{8}h^2 t_h$
- Função de mérito: $f(h, t_b) = A$

Por simplicidade, o peso das anteparas transversais e dos reforçadores não foram considerados no problema.

3.2 Vaso de Pressão

O outro problema refere-se à otimização do projeto estrutural do vaso de pressão, mostrado na figura 2. Este problema foi resolvido por diferentes métodos, Fu, Fenton e Cleghorn, (1991), Li e Chou, (1994), Thierauf e Cai, (1997). A função objetivo combina os custos de material, de conformação e de soldagem do vaso de pressão.

O conjunto de restrições está de acordo com os respectivos códigos ASME. O problema de otimização do projeto é formulado a seguir:

00005

- minimizar

$$f(\mathbf{X}) = 0.6224x_1x_3x_4 + 1.7781x_2x_3^2 + 3.1661x_1^2x_4 + 19.84x_1^2x_3$$

- sujeito a

$$g_1(\mathbf{X}) = x_1 - 0.0193x_3 \geq 0$$

$$g_2(\mathbf{X}) = x_2 - 0.00954x_3 \geq 0$$

$$g_3(\mathbf{X}) = \pi x_3^2 x_4 + \frac{4}{3} \pi x_3^3 - 750.0 \cdot 1728.0 \geq 0$$

$$g_4(\mathbf{X}) = 240.0 - x_4 \geq 0$$

$$1.000 \leq x_1 \leq 1.375$$

$$0.625 \leq x_2 \leq 1.000$$

As variáveis de projeto x_3 e x_4 são contínuas e as variáveis x_1 e x_2 são valores discretos, múltiplos de 0.0625 in.

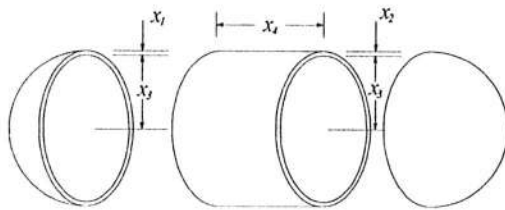


Figura 2 - Vaso de pressão

4. Resultados

Os resultados obtidos através das aplicações, em cada um dos exemplos, podem ser vistos nas tabelas 1 e 2. Comparou-se os resultados obtidos com o

Algoritmo Genético, com os resultados obtidos através da aplicação dos algoritmos de Box, Nelder-Mead e Hooke-Jeeves, o que não é uma tarefa trivial. Os algoritmos dependem de parâmetros iniciais que se adequam às suas particularidades. Os algoritmos de Nelder-Mead e Hooke-Jeeves, necessitam de um conhecimento prévio do problema por parte do usuário, que deve definir um ponto de partida, o qual tem grande influência na qualidade do resultado final. O algoritmo genético, assim como o de Box, têm a grande vantagem da não necessidade de um ponto de partida.

4.1 Tampa de Escotilha

Na figura 3 mostram-se, para o problema da Tampa de Escotilha, as funções de restrições e as curvas de nível para a superfície de resposta, utilizando-se o fator de resposta $r_k = 1000$, com as funções $f(\mathbf{X})$ e $g(\mathbf{X})$ não normalizadas. O fator de resposta adotado correlacionado ao fato de as funções, de mérito e de restrições, não estarem normalizadas não garante que o mínimo da superfície de resposta se localize no interior da região viável, resultando em modificações, durante o processo de busca, do fator de resposta e consequentemente da superfície de resposta.

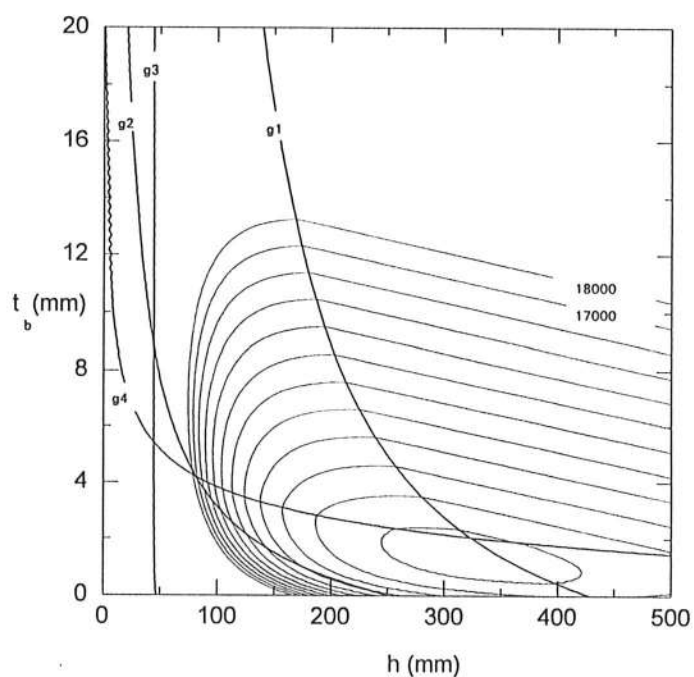


Figura 3 - Função de resposta - Tampa de Escotilha
Fator de resposta $r_k = 1000$. Funções não normalizadas

Tabela 1 - Resultados para o projeto da Tampa de Escotilha

ALGORITMO	PONTO DE PARTIDA		RESULTADOS		FUNÇÃO DE MÉRITO
	h_0	tb_0	h	tb	
Ag	-	-	314.515	3.224	7014
Box	-	-	323.886	2.932	6757
	200	5	323.813	2.932	6757
NELDER-MEAD	300	5	323.813	2.932	6757
	300	2	323.813	2.932	6757
	200	5	298.276	3.688	7408
HOOKE-JEEVES	300	5	298.276	3.688	7408
	300	2	372.704	2.750	7027

Tolerância: 10^{-5} e passo de 20 para a variável t_b , tanto para a montagem do simplex, algoritmo de Nelder-Mead, quanto passo inicial, para o algoritmo de Hooke-Jeeves. Região de busca, $h \in [1, 500]$ e $t_b \in [0, 20]$.

00007

4.2 - Vaso de pressão

Tabela 2 - Resultados para o projeto do Vaso de Pressão

	Fu, Fenton e Cleghorn	Li, H. e Chou	Thierauf e Cai	AG
f_{min}	8048.6	7127.3	7006.9	7632.4
x_1	1.125	1.000	1.000	1.000
x_2	0.625	0.625	0.625	0.625
x_3	48.380	51.250	51.812	50.007
x_4	111.745	90.991	84.591	112.604
g_1	0.191	1.011	0.000	0.035
g_2	0.163	0.136	0.131	0.148
g_3	75.875	18759.754	15.000	112456.112
g_4	128.255	149.009	155.409	127.396

5. Conclusões & Recomendações

Pelos resultados apresentados pode-se verificar a característica fundamental do algoritmo genético: explorar regiões onde encontram-se os valores ótimos e, eventualmente, os atingir. O comportamento convergente sem a garantia da optimalidade é um problema que vem sendo encontrado pelos usuários do Algoritmo. Consegue-se constatar que o AG busca, rapidamente, interessantes áreas do espaço de variáveis, mas têm se mostrado um método fraco, quando comparado com os demais, na escalada para o ótimo. Isto não reduz sua utilidade. Muito pelo contrário, nos métodos “mais” convergentes não se garante a globalidade, e, em muitas situações, não se consegue ter a flexibilidade do GA. Adicionalmente, muitos métodos são limitados a um estreita classe de problemas, como o tratamento isolado de variáveis discretas e variáveis contínuas. Como resultado, o Algoritmo Genético pode ser usado quando técnicas convencionais apresentam dificuldades naquele específico problema.

Seria interessante utilizarem-se esquemas híbridos, iniciando-se a busca com o algoritmo genético, para a descoberta de importantes regiões do problema, e, uma vez conhecidas estas regiões, aplicam-se, localmente, os métodos convencionais de programação matemática, para definirem-se os ótimos locais. Desta forma pode-se combinar a globalidade e o paralelismo do GA com o comportamento “mais” convergente das técnicas locais.

Deve-se salientar que o que se apresentou neste trabalho faz parte de uma pesquisa que tem como objetivo implementar o algoritmo genético como uma ferramenta adicional a um programa de síntese de estruturas de embarcações.

Agradecimentos. Os autores são gratos à FAPESP, Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo, pelo apoio concedido a este projeto de pesquisa.

6. Referências Bibliográficas

- Augusto, O. B., 1996 (1), "Processos de Busca não Linear para o projeto da Estrutura do Navio" BT/PNV/23, Departamento de Engenharia Naval e Oceânica - Escola Politécnica - USP.
- Augusto, O. B., 1996 (2), "Projeto Estrutural de um Navio Patrulha Costeiro" BT/PNV/26, Departamento de Engenharia Naval e Oceânica - Escola Politécnica - USP.
- Bouchard, E. E., 1988; Kidwell, G. H. ; Rogan, J. E. "The Application of Artificial Intelligence Technology to Aeronautical System Design" AIAA-88-4426, AIAA/AHS/ASSEE Aircraft Design Systems and Operations Meeting, Atlanta, September.
- Box, M. J., 1965, "A New Method of Constrained Optimization an Comparison with other Methods", Computer Journal, Vol. 8, No. 1, April, pp. 42-52.
- Cella, A. ;Soosaar,K., 1973, "Discrete Variables in Structural Optimization" in Optimun Structural Design - Theory and Applications, John Willey & Sons.
- Davidor, Y., 1989, "Genetic Algorithms for Order Dependent Process Applied to Robot Path Planning", Unpublished Ph.D. dissertation, Imperial College, University of London.
- Davis, L., 1991, "Handbook of Genetic Algorithms", Van Nostrand Reinhold.
- Fu, J., Fenton, R. G., Cleghorn, W. L., 1991, "A Mixed Integer-Discrete-Continuous Programming Method and its Application to Engineering Design Optimization", Engineering Optimization, N. 17, pp. 263-280.
- Goldberg, D.E., Samtani, M.P., 1986, "Engineering Optimization via Genetic Algorithms" Proceedings of the Ninth Conference on Eletronic Computation, 471 - 482.
- Goldberg, D. E., 1989, "Genetics Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning", Addison-Wesley.
- Grefenstette, J. J., 1986, "Optimization of Control Parameters for Genetics Algorithms", IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, SMC-16(1), pp. 122-128.
- Hillis, W. D., 1987, "The Connection Machine", Scientific American, 255(6).
- Holland, J. H., 1975, "Adaptation in Natural and Artificial Systems" Ann Arbor: The University of Michigan Press,
- Holland, J. K., 1992, "Genetic Algorithms", Scientific American, 267(1), 66-72.
- Hooke, R., Jeeves, T. A., 1961, "Direct Search Solution of Numerical and Statistical Problems", Journal of the Association of Computing Machinery, Vol. 8, April, pp. 212-229.
- Jenkins, W.M., 1997, "On the Application of Natural Algorithms to Structural Design Optimization" Engineering Structures, vol. 19, No. 4, 302 -308.
- Kitamura, K., 1972, "Studies on Optimization of Ships Structures - Optimum Design of Longitudinal Members of Tanker" J.S.N.A., No. 132.
- Li, H. L., Chou, C. T., 1994, "A Global Approach for Nonlinear Mixed Discrete Programming in Design

Optimization", Engineering
Optimization, N. 22, pp. 109-122.

Mayer-Kress, G., 1989, "A Nonlinear
Dynamical System Approach to
International Security", Technical
Report LA-UR-89-1355, Los Alamos
National Laboratory.

Nelder, J. A., Mead, R., 1965, "A
Simplex Method for Function
Minimization", Computer Journal,
Vol. 7, No. 4, Jan., pp. 308-313.

Okada, T. ;Neki, I., 1992, "Utilization of
Genetic Algorithm for Optimization
the Design of Ship Hull Structures"
J.S.N.A., vol. 171, June.

Thierauf, G., Jianbo, C., 1997, "Parallel
Evolution Strategy for Solving
Structural Optimization",
Engineering Structures, Vol. 19, N.4,
pp. 318-324.



“Proposta de Sistema de Medição de Pás de Hélice”

***Toshi-ichi Tachibana**

****Alexandre de Paula Januário**

RESUMO

O objetivo deste trabalho está em dar melhores condições técnicas para estaleiros de pequeno porte na confecção de hélices, visando o seu barateamento, havendo nesta etapa a preocupação com o controle dimensional das pás, para que haja a garantia do desempenho previsto no projeto do hélice.

ABSTRACT

The purpose of this paper is provide advances technical conditions to the small shipyard in the manufacture of the propeller, to aim at fail of it price, in this stage the preoccupation is relative to the blade dimension control, to guarantee the efficiency of in the propeller design.

1 - INTRODUÇÃO

O objetivo deste trabalho consiste em dar melhores condições técnicas para estaleiros de pequeno porte na confecção de hélices, visando o seu barateamento, havendo nesta etapa a preocupação com o controle dimensional das pás, para que haja a garantia do desempenho previsto no projeto do hélice.

Uma vez projetado o hélice de uma embarcação, a qualidade deste projeto deverá ser mantida na etapa de confecção do hélice. Sabe-se que distorções geométricas de certa ordem alteram as características hidrodinâmicas dos hélices, piorando as eficiências resultantes e até as condições de cavitação.

Uma forma de garantir o desempenho do hélice construído, próximo daquele previsto num bom projeto é através da exigência de certas precisões de confecção. Tais precisões

são definidas, em grande parte dos casos, a partir da norma nº 484 da “ISO (International Standard): Shipbuilding - Ship screw propellers - Manufacturing Tolerances” Parte 1 (D maior que 2,5m) e Parte 2 ($0,80 \leq D \leq 2,5m$). Nesta norma, são utilizados quatro níveis de precisão que devem ser escolhidos de acordo com o tipo e a missão da embarcação: classe S - altíssima precisão, classe I - alta precisão, classe II - precisão média e classe III - tolerância alta. Assim o trabalho visa uma proposta de equipamento para medição das dimensões das pás, de acordo com os padrões requeridos.

2 – PARAMETROS DE MEDIÇÃO

Nos estágios iniciais de projeto as características principais dos hélices, são determinadas em função do casco, isto é,

*Prof. Dr - E-mail: tachibana@usp.br
Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
Av. Prof. Mello Moraes, 2231 – Cep.: 05508-900
Tel.: 55-011-818-5350 - Fax.: 55-011-818-5717

** Mestrando - E-mail: alexjanu@usp.br
Dpto. de Engenharia Naval e Oceânica
São Paulo – São Paulo – Brasil

condições de calado, forma de popa pretendida, interação casco-hélice, etc. O desempenho esperado é normalmente estimado por meio de diagramas de “Séries Sistemáticas” de hélices quando não dispõe de recursos computacionais para cálculos racionais.

Determinadas as características geométricas do hélice são feitos ensaios em Tanque de Prova a fim de determinar o desempenho hidrodinâmico do hélice.

Desse programa de ensaios obtém-se os dados que deverão ser usados para o cálculo final do hélice.

2.1 – SISTEMA DE COORDENADAS E PARAMETROS A MEDIR

Para definição dos parâmetros de medição é apresentado o seguinte sistema de coordenadas (Figura 1), onde Z é no sentido do eixo do motor, X no sentido radial perpendicular ao eixo e θ o ângulo na direção do eixo.

1º passo

Medir o deslocamento linear em X para r/R

2º Passo

O comprimento da corda C_R para qualquer X e igual a:

$$\theta_2 = \theta_1 - \theta \quad [1]$$

$$C_R = ((\theta_2 * \pi) / 180) * r \quad [2]$$

3º Passo

Como obter a espessura do perfil ao longo da corda C_R para um dado r .

A espessura ao longo do perfil será medida na direção Z (figura. 3).

A partir do ponto BF variando θ , em mais um $\Delta\theta$ onde $\Delta\theta$ seja igual a 1º grau, até BA .

Exemplo:

$$\Delta\theta = 1 \quad [3]$$

$$\theta_i = \theta + \Delta\theta \quad [4]$$

$$\theta_{i+1} = \theta_i + \Delta\theta \quad [5]$$

$$\theta_n = \theta_{n-1} + \Delta\theta \quad [6]$$

$$\theta_n = \theta_1 + \theta \quad [7]$$

Para obter a espessura t do perfil e a distância Y ao longo da corda C_R onde t e Y é igual a:

$$t_i = Y - (z_1 + z_2) \quad [8]$$

$$Y_i = (\sum \Delta\theta / 180) * X \quad [9]$$

onde t_0 é o ponto na BF (borda de fuga) e t_n é o ponto na BA (borda de ataque).

As figuras 2, 3, 4 e 5 mostram todos os detalhes dos parâmetros utilizados acima.

3 - INSTRUMENTAÇÃO

Para medição dos parâmetros descritos anteriormente foram empregados os transdutores descritos a seguir.

Com 2 (dois) transdutores do tipo potenciômetro para medir ângulo, situado nas extremidades do bosso, e 4 (quatro) do tipo linear LVDT (Transdutor de deslocamento linear) para medir deslocamento, ficando 2 (dois) na horizontal acima do potenciômetro e 2 (dois) na horizontal, conforme diagrama esquemático na figura. 6.

O potenciômetro n°1 mede o deslocamento angular no dorso e o potenciômetro n°2 mede o deslocamento angular na face. O LVDT A mede o raio do perfil cilíndrico no dorso, o LVDT B mede o raio do perfil cilíndrico na face, o LVDT C mede o deslocamento do LVDT C até a pá no dorso e o LVDT D mede o deslocamento do LVDT D até a pá na face.

3.1 TRANSDUTOR DIFERENCIAL VARIÁVEL LINEAR (LVDT)

O LVDT é um transdutor eletrônico que fornece uma saída elétrica proporcionando o deslocamento de um núcleo móvel. A Figura. 7 mostra o arranjo físico de um LVDT.

Três bobinas estão igualmente espaçadas sobre uma forma cilíndrica. Um núcleo magnético em forma de haste é colocado axialmente no interior desse conjunto, orientando a trajetória do fluxo magnético.

00002

Energizando-se o centro ou a bobina primária com corrente alternada, é induzida uma tensão nas duas bobinas externas. Na configuração do transdutor LVDT, figura. 8, as bobinas externas ou secundárias são conectadas opostamente em séries de modo que as duas tensões induzidas sejam de fases opostas. Assim, a saída resultante do transformador é a diferença entre essas duas tensões. Para uma posição central do núcleo em forma de haste a tensão de saída é nula. Esta é a posição nula ou ponto de equilíbrio. Tirando-se o núcleo do ponto de equilíbrio, a tensão induzida aumenta na bobina para onde o núcleo é movimentado, causando a diminuição da tensão na bobina oposta, o que produz uma tensão diferencial. O movimento do núcleo em sentido oposto, além do ponto de equilíbrio, produz uma característica semelhante de tensão linear com fase deslocada de 180°. A figura. 8 mostra um gráfico de tensão de saída pela posição do núcleo dentro do limite linear do transdutor. A curva é uma linha reta que atravessa a origem ou ponto nulo se forem usados os sinais de + ou - para indicar as fases opostas. Se as tensões forem plotadas como quantidades positivas sem levar em consideração a fase, a curva será um V como a da Figura.9.

O condicionador eletrônico usado em conjunto com o LVDT para recuperar a informação, é detector sensível à fase, e tem a seguinte configuração, tal desenho pode ser visto na figura 10.

3.2 TRANSDUTOR POTENCIÔMETRICO

O potenciômetro é um método baseado na idéia de opor duas diferenças de potenciais para que se cancelem e não haja fluxo de corrente resultante. A figura.11 mostra o potenciômetro básico. Uma diferença de potencial variável é produzida entre o extremo de um resistor e um cursor que se move ao longo do resistor, fluindo uma corrente constante através do resistor. Quando essa diferença de potencial é aplicada em oposição à diferença de

potencial que está sendo medida, não fluirá corrente entre elas quando tiverem o mesmo valor. O valor da diferença de potencial em que isso ocorre está relacionado com a diferença de potencial e, é convertida em um deslocamento angular que pode ser diretamente indicado.

A escala de deslocamento pode ser calibrada em termos de diferença de potencial aplicando-se diferenças de potenciais conhecidas para serem medidas pelo instrumento. As diferenças de potenciais padrão geralmente são obtidas pelas pilhas especialmente projetadas, ou outros sistemas que nos forneça tensão constante. Se o resistor no potenciômetro tiver resistência constante por milímetro de comprimento, então o deslocamento (L) do cursor a partir de uma extremidade será diretamente proporcional à diferença de potencial:

$$V \propto L \text{ OU } V = kL \quad [10]$$

onde k é uma constante. Com a diferença de potencial padrão (V_s) e um deslocamento (L_s).

$$V_s \propto L_s \text{ ou } V_s = kL_s \quad [11]$$

$$\text{Assim, } (V/V_s) = (L/L_s) \quad [12]$$

3.4 - CALIBRAÇÃO

A calibração deve ser feita muito próxima das condições de uso real, incluindo a mesma fixação, o mesmo ambiente e a mesma tensão de excitação e frequência.

A calibração será feita estabelecendo-se dois pontos tão distantes quanto possível, porém dentro da escala que realmente vai ser usada. São necessárias duas quantidades ou posições de referência externas bem conhecidas.

Para a calibração dos potenciômetro e dos LVDT's, foram estabelecidas essas variações que são mostradas a seguir, e que podem ser alteradas de acordo com as necessidades dimensionais do hélice.

00003

Potenciômetro

θ	mV
0°	Y
90°	2Y
180°	4Y

LVDT (A) e (B)

X	mV
1R	10X mV
0,95R	9X mV
0,90R	9X mV
0,50R	5X mV
0,2R	2X mV

LVDT (C) e (D)

Z	mV
d(100cm)	10Z mV
d(50cm)	5Z mV
d(1cm)	1Z mV

3.5 - SENSIBILIDADE

A sensibilidade nominal é geralmente dada em termos de tensão (milivolts ou volts) por microns de deslocamentos do núcleo por volt de entrada (comumente escreve-se mV/ μ m/volt entrada). A tensão de saída real para um dado deslocamento do núcleo é determinado multiplicando-se a sensibilidade pelo deslocamento em

microns e então multiplicando-se este produto pela tensão de entrada.

4 - TRATAMENTO DOS DADOS - DESENHO DA PÁ EXPANDIDA.

Neste item será fornecido o modo de desenhar a pá expandida a partir dos dados obtidos.

Para cada arquivo que representa um X (raio do perfil cilíndrico), segue-se os seguintes procedimentos: figura.5.

1 - Traçar a corda

$$ar = [((\theta + \theta_l) - 90^\circ)/180] * X \quad [13]$$

$$w = C_R - ar \quad [14]$$

2 - Traçar o perfil ao longo da corda.

1º) Dispor ao longo da corda os φ_{face} (perfil da face) do ponto BF até $t_{máx}$ e de $t_{máx}$ até BA.

onde:

$$P > 0$$

$$\varphi_{face} = V_1 * (t_{máx} - t_n) \quad [15]$$

φ_{face} do ponto BF até $t_{máx}$.

Onde V_1 é um valor constante obtido da tabela 1.

$$P < 0$$

$$\varphi_{face} = V_2 * (t_{máx} - t_0) \quad [16]$$

φ_{face} do ponto $t_{máx}$ até BA.

Onde V_2 é um valor constante tirado da tabela 2.

2º) Dispor as espessuras ao longo da corda.

onde:

$$\varphi_{dorso i} = \varphi_{face i} + t_i, \text{ para cada } Y_i. \quad [17]$$

Y_i (distância entre os LVDT's (C) e (D))

Figura 4.

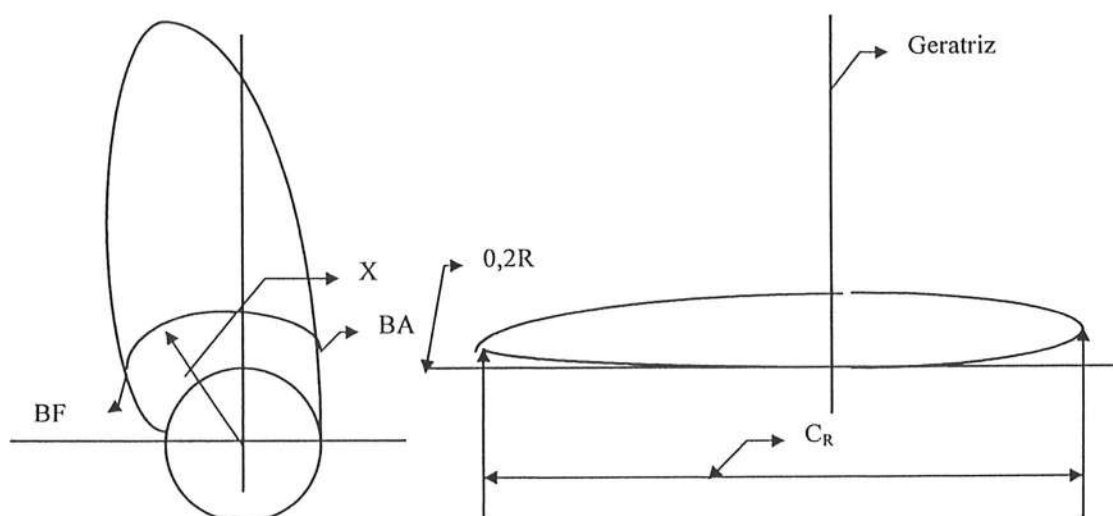
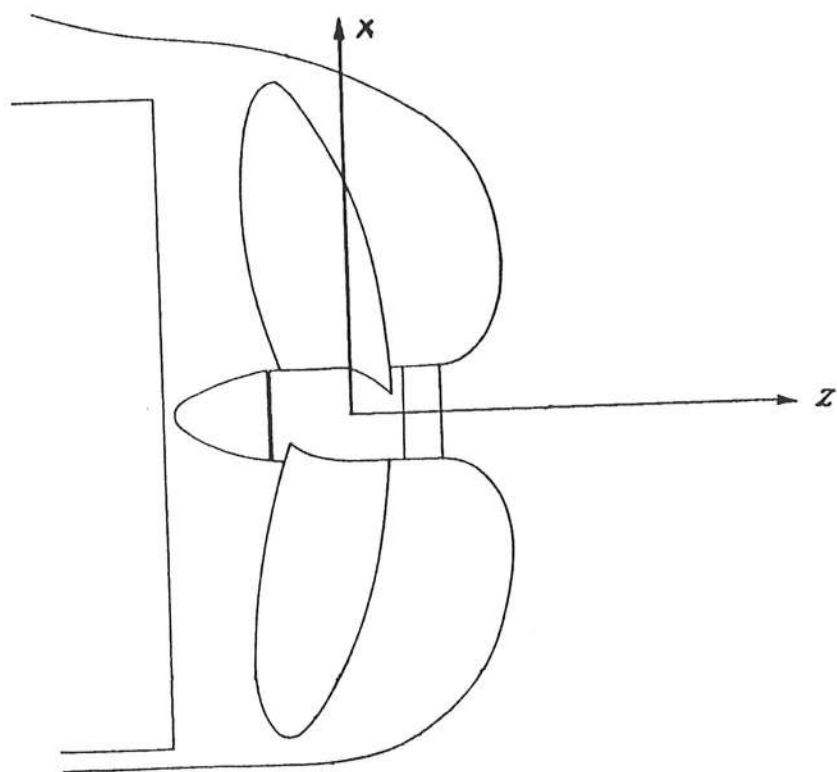
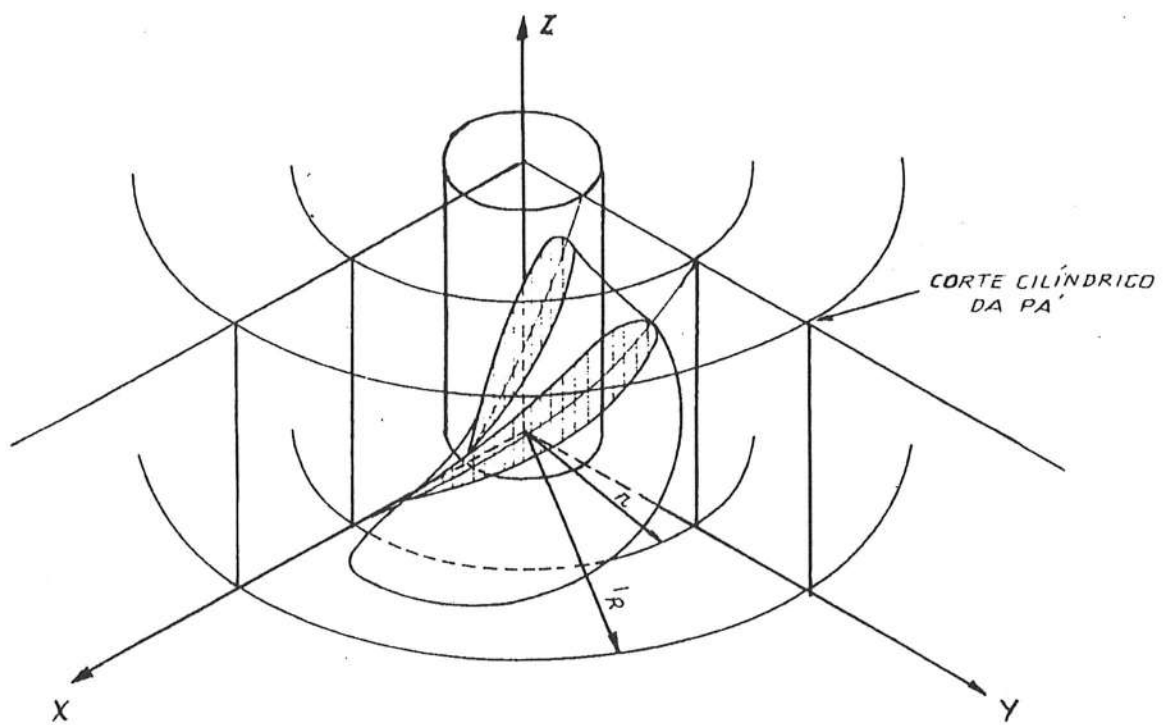


Figura 2



00005

Figura 1 – Sistemas de Coordenadas

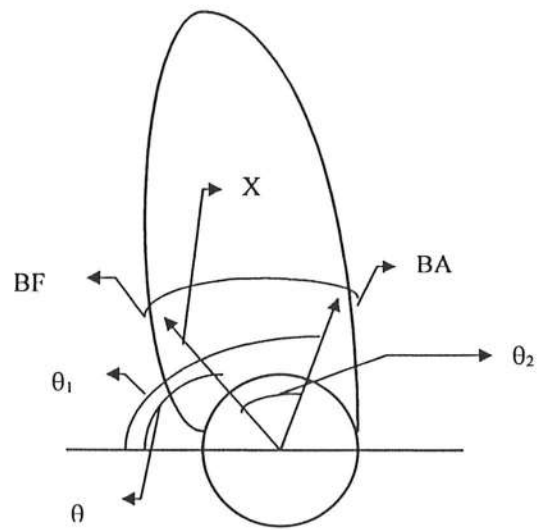


Figura 3

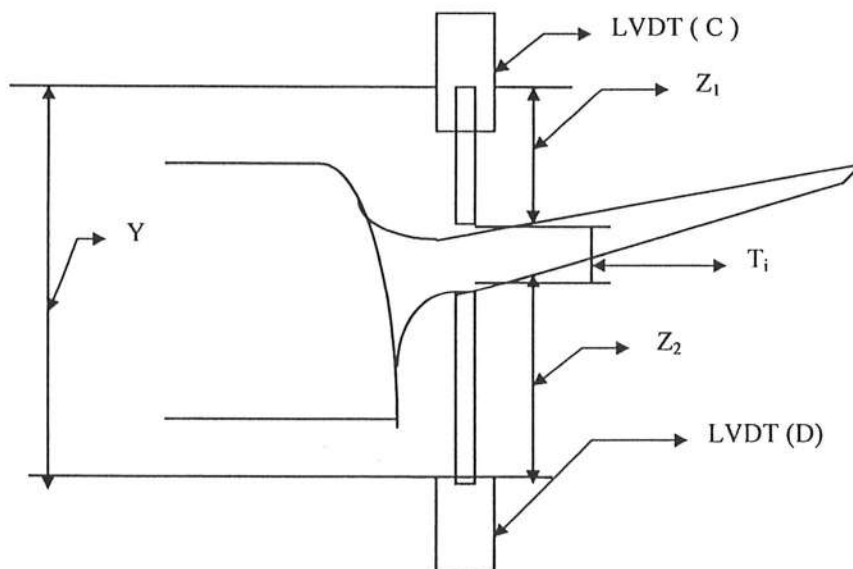


Figura 4

00006

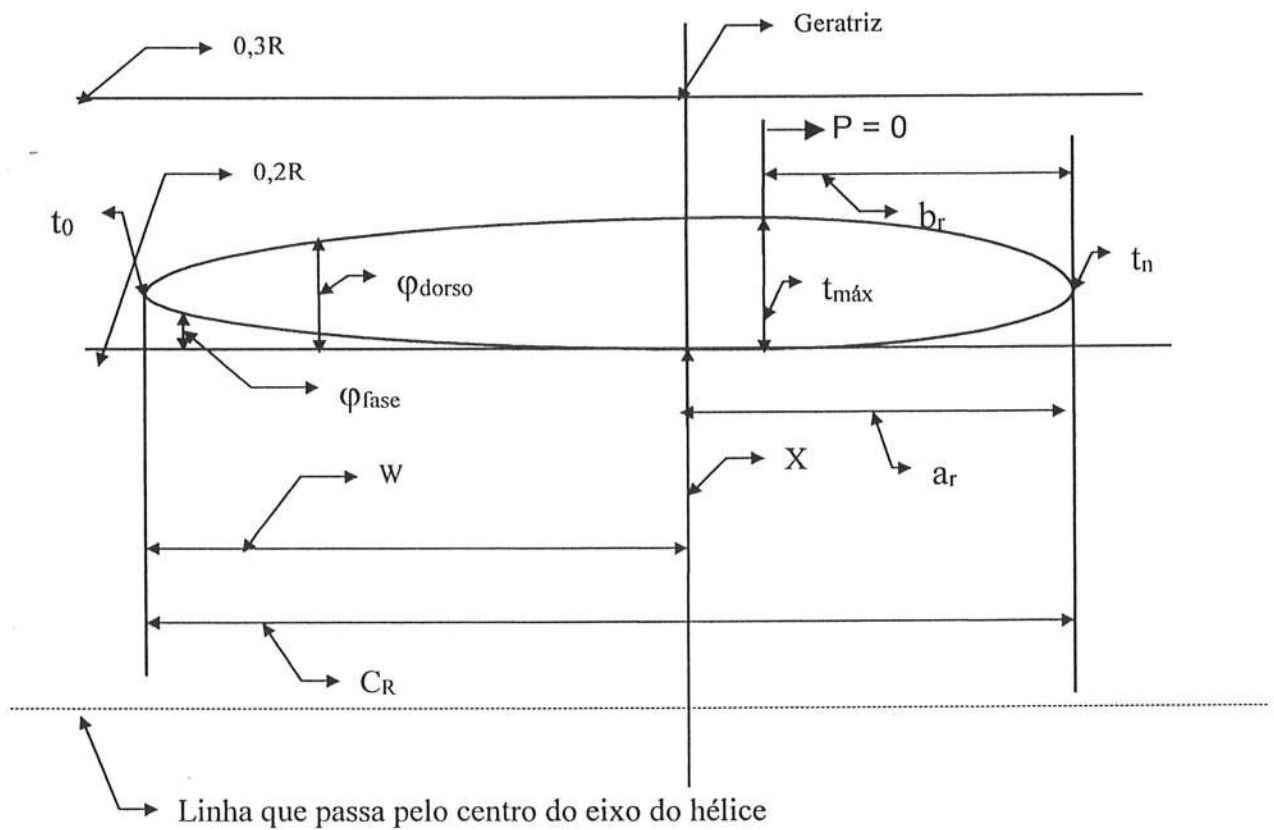
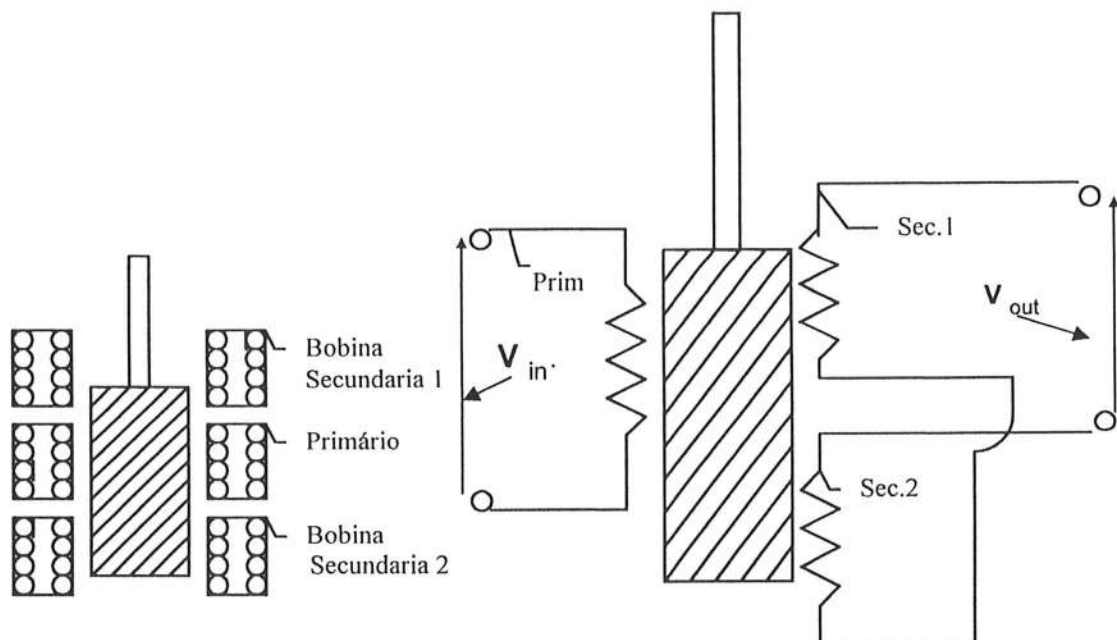


Figura 5 – Definição geométrica do perfil da pá.



00007

Figura. 7 – Transdutor Linear Variável (LVDT)

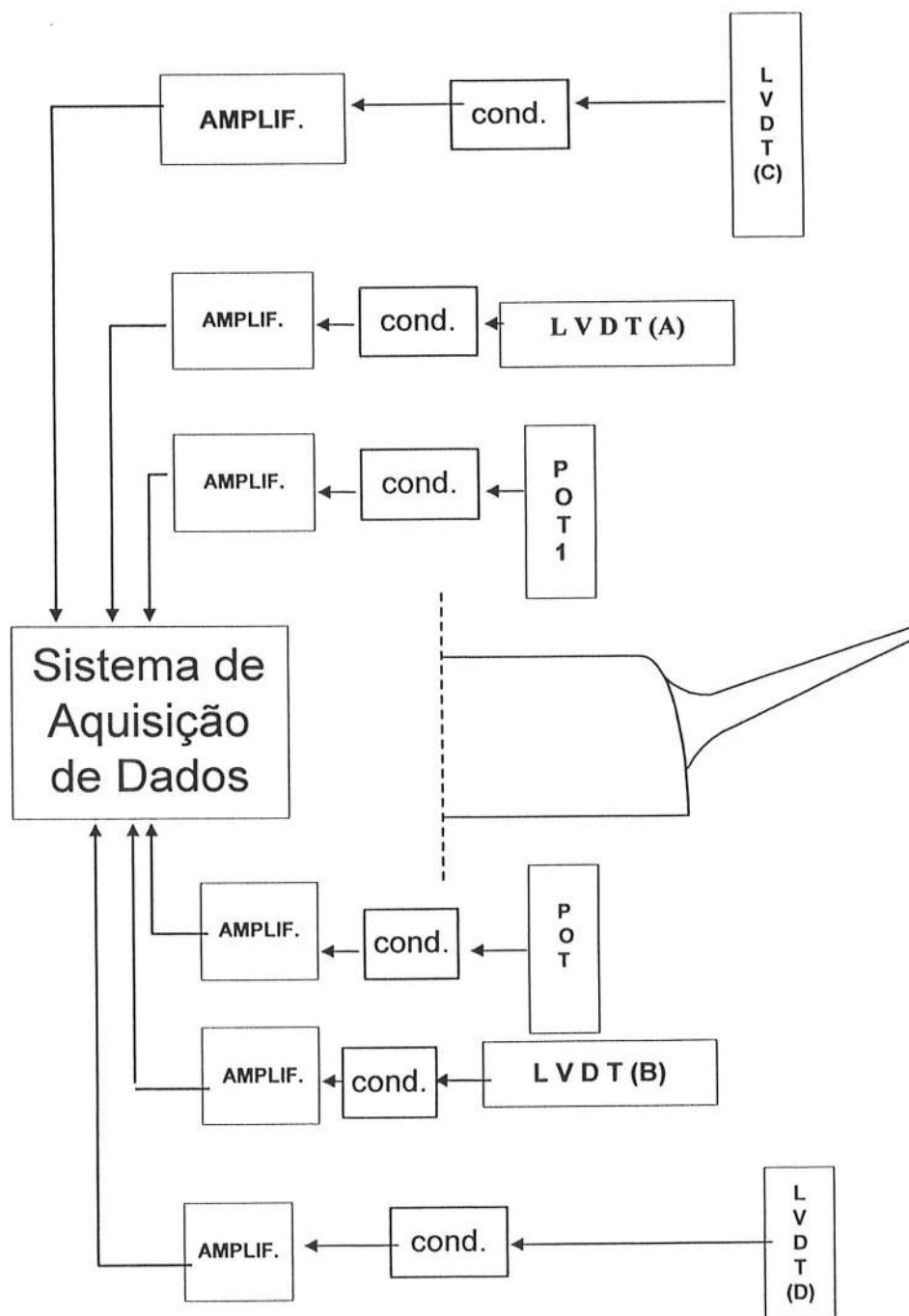


Figura 6 - Diagrama Esquemático

00008

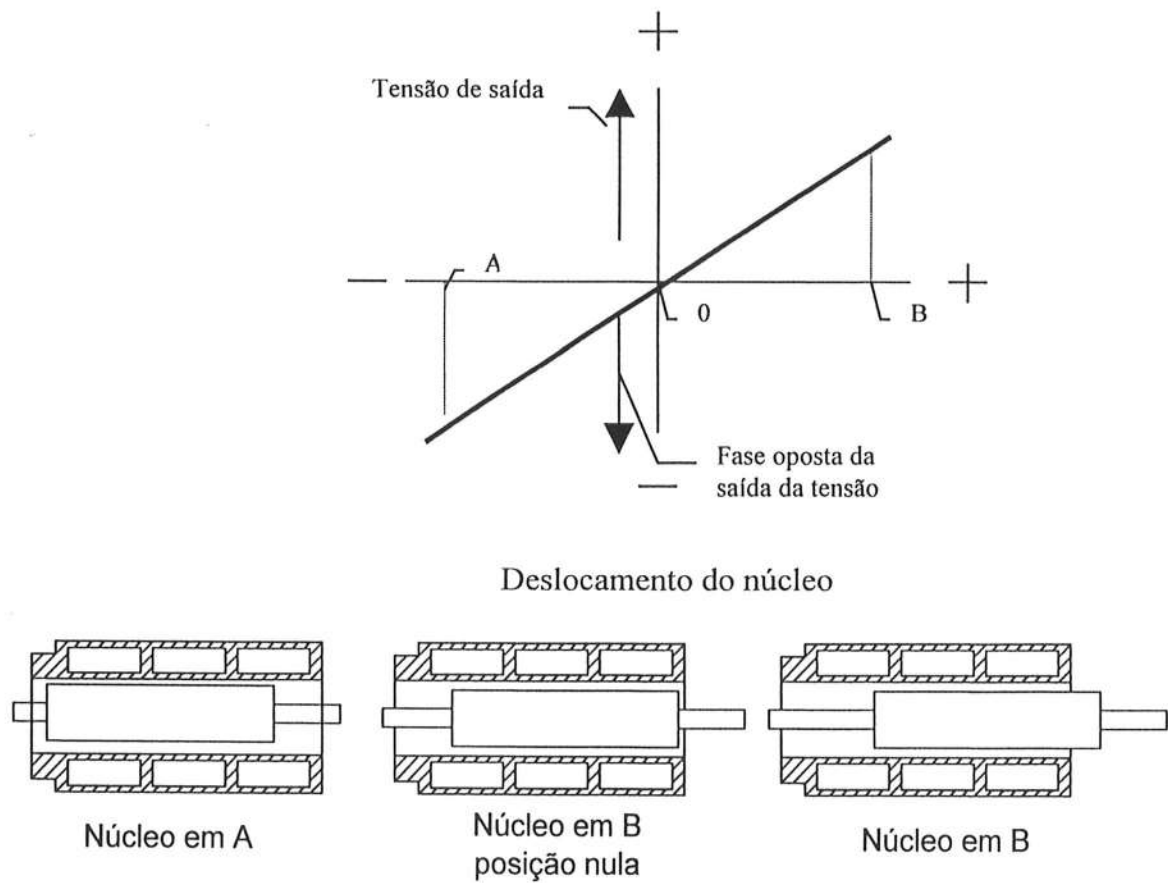


Figura 8 - Saída de fase do LVDT em função da posição do núcleo; gráfico linear.

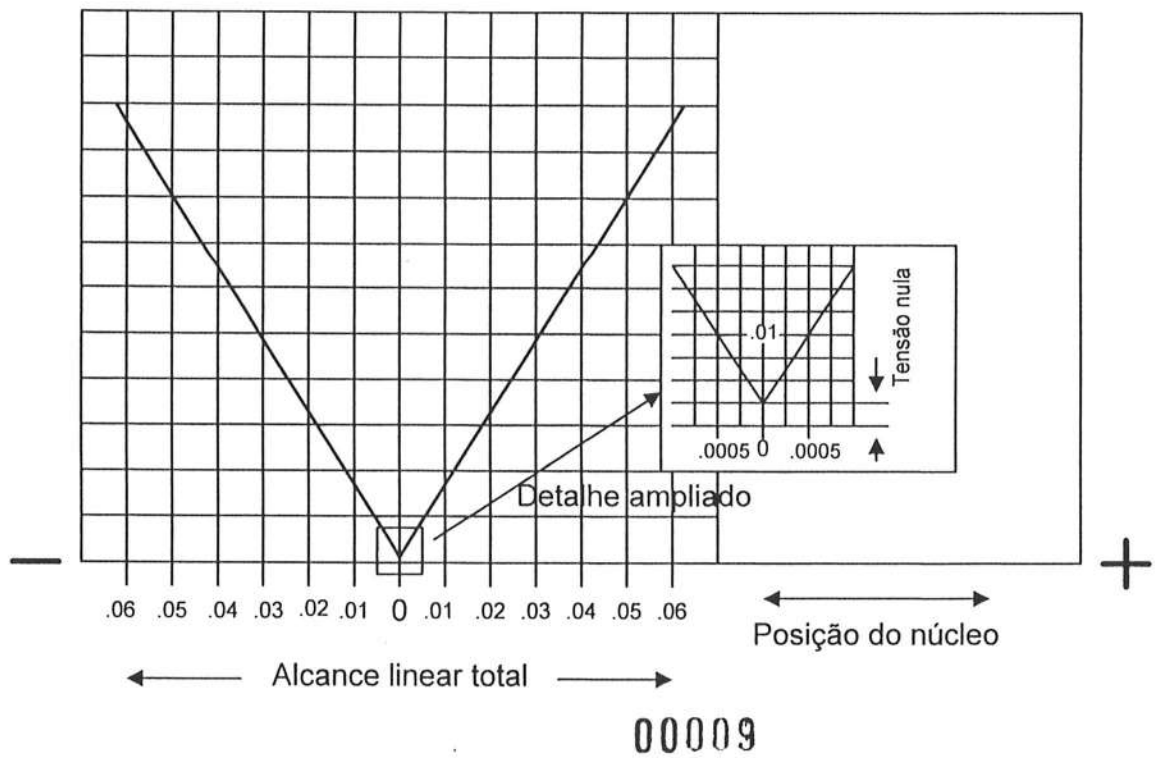


Figura 9 - Gráfico V Amplitude absoluta da tensão de saída do LVDT em função da posição

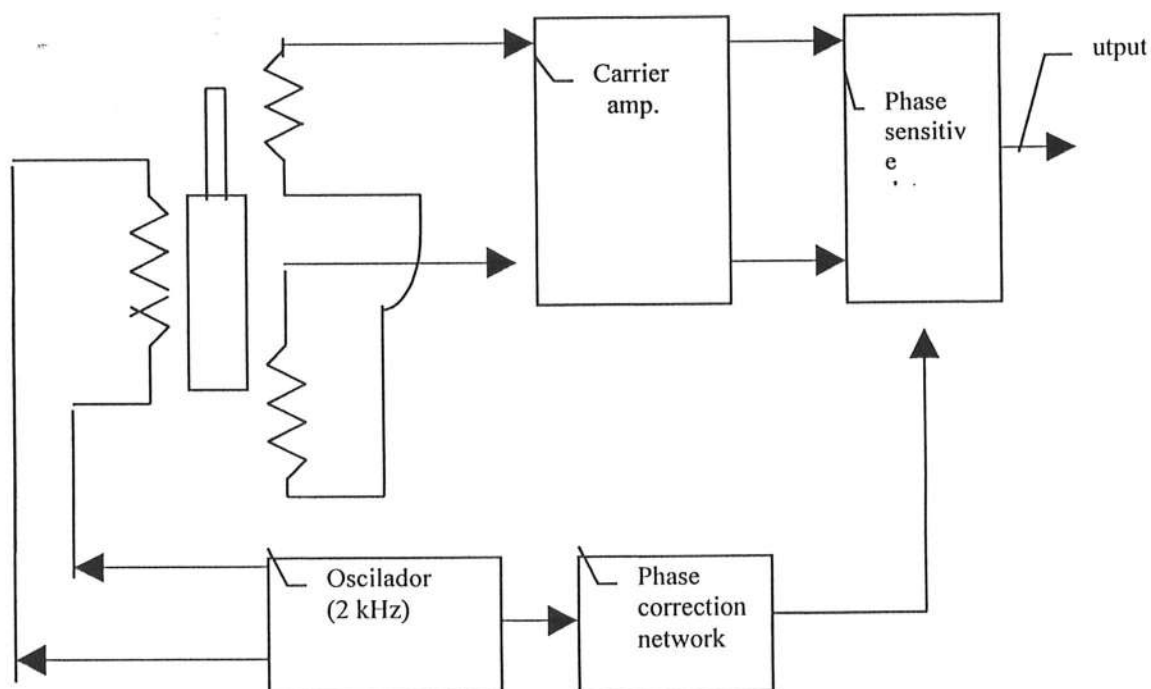


Figura.10 - Condicionador do LVDT

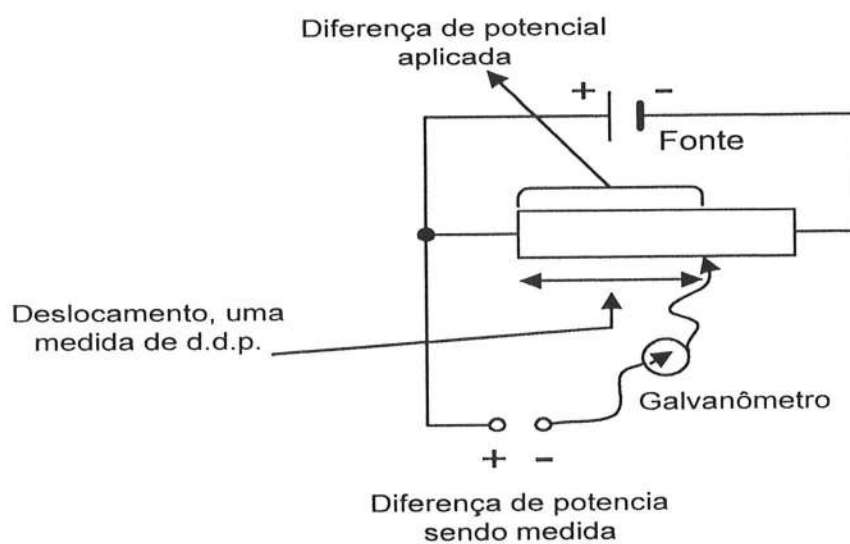


Figura. 11 - Potenciômetro Básico

00010

Tabela - 1 [3]

Passo

r/R	-1.0	-0.95	-0.9	-0.8	-0.7	-0.6	-0.5	-0.4	-0.2	0
0.7-1.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.5	0.0522	0.0422	0.0330	0.0190	0.0100	0.0040	0.0012	0	0	0
0.4	0.1467	0.1200	0.0972	0.0630	0.0395	0.0214	0.0116	0.0044	0	0
0.3	0.2306	0.2040	0.1790	0.1333	0.0943	0.0623	0.0376	0.0202	0.0033	0
0.25	0.2598	0.2372	0.2115	0.1651	0.1246	0.0899	0.0579	0.0350	0.0084	0
0.2	0.2826	0.2630	0.2100	0.1967	0.1570	0.1207	0.0880	0.0592	0.0172	0
0.15	0.3000	0.2824	0.2650	0.2300	0.1950	0.1610	0.1280	0.0955	0.0365	0

r/R	+1.0	+0.95	+0.9	+0.85	+0.8	+0.7	+0.6	+0.5	+0.4	+0.2	0
0.7-1.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.6	0.0382	0.0169	0.0067	0.0022	0.006	0	0	0	0	0	0
0.5	0.1278	0.0778	0.0500	0.0328	0.0211	0.0085	0.0034	0.0008	0	0	0
0.4	0.2181	0.1467	0.1088	0.0833	0.0637	0.0357	0.0189	0.0090	0.0033	0	0
0.3	0.2923	0.2186	0.1760	0.1445	0.1191	0.0790	0.0503	0.0300	0.0148	0.0027	
0.25	0.3256	0.2513	0.2068	0.1747	0.1465	0.1008	0.0669	0.0417	0.0224	0.0031	0
0.2	0.3560	0.2821	0.2353	0.2000	0.1685	0.1180	0.0804	0.0520	0.0304	0.0049	0
0.15	0.3860	0.3150	0.2642	0.2230	0.1870	0.1320	0.0920	0.0615	0.0384	0.0096	0

Tabela - 2 [3]

Passo

r/R	-1.0	-0.95	-0.9	-0.8	-0.7	-0.6	-0.5	-0.4	-0.2	0
0.9-1.0	0	0.0975	0.190	0.360	0.510	0.640	0.750	0.840	0.960	1
0.85	0	0.0975	0.190	0.360	0.510	0.640	0.750	0.840	0.960	1
0.8	0	0.0975	0.190	0.360	0.510	0.640	0.750	0.840	0.960	1
0.7	0	0.0975	0.190	0.360	0.510	0.640	0.750	0.840	0.960	1
0.6	0	0.0965	0.1885	0.3585	0.5110	0.6415	0.7530	0.8426	0.9613	1
0.5	0	0.0950	0.1865	0.3569	0.5140	0.6439	0.7580	0.8456	0.9639	1
0.4	0	0.0905	0.1810	0.3500	0.5040	0.6353	0.7525	0.8415	0.9645	1
0.3	0	0.0800	0.1670	0.3360	0.4885	0.6195	0.7335	0.8265	0.9583	1
0.25	0	0.0725	0.1567	0.3228	0.4740	0.6050	0.7184	0.8139	0.9519	1
0.2	0	0.0640	0.1455	0.3060	0.4535	0.5842	0.6995	0.7984	0.9446	1
0.15	0	0.0540	0.1325	0.2870	0.4280	0.5585	0.6770	0.7805	0.9360	1

r/R	+1.0	+0.95	+0.9	+0.85	+0.8	+0.7	+0.6	+0.5	+0.4	+0.2	0
0.9-1.0	0	0.0975	0.1900	0.2775	0.3600	0.5100	0.6400	0.7500	0.8400	0.9600	1
0.85	0	0.1000	0.1950	0.2830	0.3660	0.5160	0.6455	0.7550	0.8450	0.9615	1
0.8	0	0.1050	0.2028	0.2925	0.3765	0.5265	0.6545	0.7635	0.8520	0.9635	1
0.7	0	0.1240	0.2337	0.3300	0.4140	0.5615	0.6840	0.7850	0.8660	0.9675	1
0.6	0	0.1485	0.2720	0.3775	0.4620	0.6060	0.7200	0.8090	0.8790	0.9690	1
0.5	0	0.1750	0.3056	0.4135	0.5039	0.6430	0.7478	0.8275	0.8880	0.9710	1
0.4	0	0.1935	0.3235	0.4335	0.5220	0.6590	0.7593	0.8345	0.8933	0.9725	1
0.3	0	0.1890	0.3197	0.4265	0.5130	0.6505	0.7520	0.8315	0.8920	0.9750	1
0.25	0	0.1758	0.3042	0.4108	0.4982	0.6359	0.7415	0.8315	0.8899	0.9751	1
0.2	0	0.1560	0.2840	0.3905	0.4777	0.6190	0.7277	0.8170	0.8875	0.9750	1
0.15	0	0.1300	0.2600	0.3665	0.4520	0.5995	0.7105	0.8055	0.8825	0.9760	1

6 - SIMBOLOGIA

LVDT - transdutor diferencial variável linear

θ - ângulo

mV - milivolt

BA - borda de ataque

BF - borda de fuga

X, α - raio do perfil cilíndrico

R - raio do hélice

C_R, L - comprimento da corda

br - distância da BA (borda de ataque) até espessura máxima do perfil

ar - distância da BA (borda de ataque) até geratriz

φ_{dorso} - distância da corda até dorso do perfil

φ_{fase} - distância da corda até face do perfil

t_{max} - espessura máxima do perfil

t_n - espessura na borda de ataque

t₀ - espessura na borda de fuga

z₁ - distância do LVDT (C) até a pá do hélice

z₂ - distância do LVDT (D) até a pá do hélice

Y - distância entre os LVDT's (C) e (D)

7 - AGRADECIMENTOS

Agradecemos a FAPESP pelo incentivo à pesquisa que tem oferecido recurso para o desenvolvimento do meu projeto. Ao Departamento de Engenharia Naval e Oceânica da Universidade de São Paulo que oferece estrutura para desenvolvimento de meus trabalhos.

A todos que de forma direta ou indiretamente nos auxiliaram para que o trabalho pudesse alcançar até o nível atual.

8 - REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

- (1) SIEMENS, A.G. - Instrumentação Industrial, São Paulo, 1976
- (2) BOLTON, W. - Instrumentação & Controle, São Paulo, 1976
- (3) PRINCIPLES OF NAVAL ARCHITECTURE (PNA) VOL. II 1988
- (4) SOISSON, Harold E. - Instrumentação Industrial - São Paulo, 1987
- (5) BECKWITH, Thomas G.; BUCK, N.L. - Mechanical Measurements 2.ed., 1973
- (6) HANDBOOK OF APPLIED INSTRUMENTATION - 1964
- (7) ZANUTTO, J.C.; RUBIO, M.R. - Curso de Introdução à Instrumentação em
- (8) Engenharia - METROTEC - São Paulo, 1985 - (Publicação Técnica nº 79)
- (9) TACHIBANA, T - Série Sistemática de Hélices - (Apostila)
- (10) TACHIBANA, T - A Geometria do Hélice Marítimo - EPUSP , 1978 (Apostila)
- (11) PADOVEZI, C. D. - Otimização de Hélice de Pequenas Embarcações Utilizando Séries Sistemáticas; XI PAN-AMERICAN NAVAL ENGINEERING CONGRESS
- (12) TACHIBANA, T - Sistema de Proteção de Hélice para Embarcação Fluviais (SOBENA 96) SOCIEDADE BRASILEIRA DE ENGENHARIA NAVAL.

00011



TRANSPORTE INTERMODAL NO CORREDOR CENTRAL DA COLÔMBIA

JAIRO H. CABRERA MSc - Prof. Dr. R. C. BOTTER

Departamento de Engenharia Naval e Oceânica da USP - São Paulo (SP) - Brasil
e-mail: jaitovar@usp.br - rcbotter@usp.br

RESUMO

Este trabalho introduz a representação do sistema real de transporte no Corredor Central do rio Magdalena, através de um modelo de simulação, de modo a conduzir experimentos nas diferentes alternativas de transporte integrando os modais hidroviários, ferroviários e rodoviário, com o objetivo de dimensionar as frotas envolvidas, as capacidades de estocagem nos terminais e centros de transbordo e os custos decorrentes para cada uma destas opções, a fim de se chegar numa solução "otimizada" ou que minimize os custos envolvidos e apresente boa produtividade.

ABSTRACT

This work introduces a representation of a real system of transport in the *Corredor Central del Rio Magdalena*, through a simulation model to test different options of multimodal transport system using road, rail and inland water way transport modals, with the aim of quantifying the fleet, the holding capacity of terminals and cost involved in each intermodal options, in order to reach an optimized solution or minimize the including cost and which has good productivity.

1. INTRODUÇÃO

Dentro do marco da globalização do comércio internacional, a abertura econômica na Colômbia tem imposto uma estratégia de modernização do aparato produtivo. Neste contexto, a implementação de um sistema logístico de transporte mais eficiente e moderno, permitiria otimizar a velocidade, operação e confiabilidade no movimento de mercadorias, contribuindo assim para aumentar a competitividade no mercado Internacional.

Atualmente a eficiência e qualidade dos serviços, entre os diferentes modos de transporte na Colômbia, não alcançam os níveis de competitividade requeridos. O custo de transporte representa até 30% do preço final das importações e exportações, comparado com os 10% em outros países.

Isto deve-se a múltiplos fatores, entre eles a geografia do país e a baixa eficiência do sistema de transporte. Deste último, o modo fluvial sobressai como o mais sub-utilizado, em especial no rio Magdalena.

Poucos estudos tem realizados sobre o potencial do rio como via de navegação. Os que mais se destacam foram os realizados pela missão técnica colombo-holandesa (MITCH) em 1971 e o “Estudio de Transporte en el área del Río Magdalena”, preparado pelo *Netherland Economic Institute* em 1974. Estes serviram como base ao mais completo estudo realizado até o momento, “Estudio de Factibilidad para Transporte Intermodal por el Río Magdalena” em 1995, onde foram analisadas todas as variáveis e enfoques estratégico-logísticos, assim como técnico-econômicos que poderiam intervir na estruturação, implementação e desenvolvimento do transporte intermodal pelo Corredor Central, com epicentro no porto de Cartagena utilizando o rio Magdalena.

Este trabalho pretende dar mais uma contribuição ao desenvolvimento do transporte multimodal pelo corredor central, isto é, elaborando um modelo de simulação, utilizando recursos de programação e animação a fim de auxiliarmos o entendimento do comportamento global do sistema, assim como de cada uma das possíveis alternativas multimodais, com o objetivo de dimensionar as frotas envolvidas, a capacidades de estocagem nos terminais e centros de transbordo e os custos recorrentes para cada uma destas opções.

Para a caracterização do modelo proposto, serão necessários conhecer a demanda da carga, sua origem, e destino e a quantidade de TEU's movimentados; as características operacionais dos terminais e centros de transbordo, de cada modal e os parâmetros de custo envolvidos, pois, como é bem sabido que soluções operacionalmente realizáveis nem sempre poderão ser economicamente viáveis.

2. CARACTERIZAÇÃO DO SISTEMA

Do ponto de vista geográfico, o Corredor Central, por onde é realizado o movimento de produtos entre o litoral norte e o centro do país abrange basicamente o sistema fluvial do rio Magdalena. Ali localizam-se as cidades e regiões mais importantes do país: Santa Fé de Bogotá, Medellín, Cali, Barranquilla, Cartagena, Bucaramanga e o Eixo Cafeteiro, onde concentram-se 80% da população e mais de 90% das atividades de produção e consumo nacional.

Nesse corredor é de grande importância o porto de Cartagena de Indias, na sua condição como cidade portuária de primeira ordem e principal terminal especializado de contêineres do país. Além disso, por sua posição estratégica, constitui o epicentro do transporte intermodal de todo o país e em particular do Corredor Central, motivo do presente estudo. O sistema Corredor Central, com a infra-estrutura existente, pode-se identificar a conformação de uma rede de transporte intermodal, integrada pelos sub-sistemas modais hidroviários, ferroviários e rodoviários.

2.1 Sub-sistema Hidroviário

O subsistema hidroviário constitui a coluna vertebral da rede intermodal do Corredor Central e conformado pelo rio Magdalena, por onde escoam mais de 80% da carga fluvial do país. Este rio corre de sul ao norte, pelo centro do território nacional, comunicando-o com os portos marítimos de Barranquilla e Cartagena de Indias, este último por intermédio do *Canal del Dique*.

A perda da importância do rio como via de transporte, através das últimas décadas, deve-se em grande parte à falta de confiabilidade, que não garante uma navegação contínua por limitações de profundidade e pelo estado atual do canal navegável, produto da falta de dragagem e manutenção. Refletindo isto numa perda gradual da carga transportada pelo rio, passando do 6% da carga total em 1970 ao 1.3% em 1990.

A falta de canalização e a baixas profundidades afetam significativamente as operações das frotas. A principal atividade fluvial e a maior frequência de viagens realiza-se no período de chuvas. O rio Magdalena foi dividido em quatro trechos diferentes, cada um destes com características específicas. Estes são de norte ao sul, os compreendidos entre os portos de Cartagena, Capulco, Barrancabermeja, Puerto Berrio e Puerto Salgar. Para sua caracterização foram necessárias as distâncias e os calados permitidos para os períodos de chuvas e de secas para os diferentes trechos do rio.

Atualmente o transporte de carga efetua-se em comboios compostos por um rebocador e várias chatas. A idade média da frota é superior a 41 anos e considerando a vida útil destas embarcações em 25 anos, conclui-se a necessária renovação das embarcações.

O estudo de viabilidade para o transporte intermodal pelo rio Magdalena de 1995 desenvolveu um critério de viabilidade, que permitiu escolher 5 tipos de embarcações fluviais porta-contêineres, em correlação com as condições do sistema fluvial do rio Magdalena e que de acordo com as características, possam oferecer a maior capacidade e eficiência para o transporte multimodal pelo Corredor Central. O estudo estruturou conceitos que facilitaram a determinação da melhor

solução entre embarcações fluviais porta-containêres, desde o ponto de vista de adaptabilidade ao rio Magdalena e de competitividade frente aos outros meios de transporte de carga.

Como já foi indicado a profundidade da água disponível é a maior limitação que se apresenta. Esta falta de profundidade afeta diretamente a eficiência das embarcações. A máxima Carga em TEU's que pode ser transportada pelo tipo de embarcação para as condições restritas de navegação do sistema fluvial do rio Magdalena é mostradas na tabela 1.

Para o cálculo do tempo de navegação consideraram-se as diferentes condições que apresenta o rio Magdalena, tanto para jusante como para montante. Se tem previsto que as embarcações indicadas aqui, possam navegar a montante a uma velocidade média não inferior a 12 Km/h. A velocidade da navegação a jusante, considera-se para este estudo de 16 Km/h.

Quanto aos custos envolvidos, os parâmetros necessários para a análise da viabilidade econômica para implementar o transporte fluvial de containers pelo Corredor Central, nas diferentes possibilidades de redes intermodais e levando-se em consideração os diferentes tipos de embarcações propostas no item anterior, são:

Custos Fixos e Variáveis:

- Aquisição da Embarcação;
- Depreciação anual;
- Manutenção;
- Seguro;
- Tripulação;
- Alimentação.

Custos Operacionais:

- Combustível;
- Lubrificante;
- Pedágio;
- Segurança.

2.2 Sub-sistema Rodoviário

Os trechos das estradas indicados na figura 1, que conformam a Rede Intermodal do Corredor Central, apresentam características com grandes variações, em especial devido as zonas montanhosas, onde aparecem inclinações de até 12%. De acordo a estudos, considera-se que esta rede será suficiente para atender a demanda terrestre pelo Corredor e não prevê-se, no medio prazo, perdas da capacidade. As características físicas e operacionais como a distância entre as conexões com a hidrovia e a ferrovia e a velocidade média dos veículos de cada um dos trechos são listadas na tabela 2. Outros dados necessários para a completa caracterização, são a capacidade dos veículos, assumindo-se a um TEU por caminhão, e as taxas respectivas de carregamento e descarregamento, decorrentes das capacidades operacionais nos terminais.

2.3 Sub-sistema Ferroviário

Em relação as ferrovias de interesse para a conformação do Sistema Intermodal do Corredor Central, junto à rede rodoviária e fluvial do rio Magdalena, identificam-se trechos que comunicam diretamente os portos de Capulco e La Dorada com Medellín e Bogotá, estabeleceu-se as características operacionais do sistema, as distâncias e em especial as velocidades, mostradas na tabela 3, que provavelmente será aumentada de acordo com o previsto pela S.T.F. (Sociedad de Transporte Ferroviário) em razão de trabalhos de recuperação nos trechos referidos. Dados sobre as taxas de carregamento e descarregamento deverão ser estabelecidas assim como a capacidade do veículo, fixado para o presente estudo a ser de 15

vagões, transportando 30 TEU's por composição.

2.4 Rede Intermodal

Assim, os modos hidroviários, rodoviários e ferroviários acima descritos e ilustrados na figura 1, se interligam entre si para conformar a rede de transporte intermodal do Corredor Central. Vale a pena afirmar que, atualmente o Corredor não conta com a infra-estrutura adequada de modo a poder ser utilizada eficientemente como uma rede multimodal de transporte, mesmo que para lograr este fim dever-se completar e reabilitar algumas rodovias e ferrovias, recuperar a navegação pelo rio Magdalena e adequar os portos de transferência.

O estudo de viabilidade para o transporte intermodal pelo rio Magdalena de 1995, chegou à conclusão que levando em consideração a situação atual e as melhoria que se estão implementando à infra-estrutura, há condições de integrar a rede intermodal hidro-ferro-rodoviária, em duas alternativas, mostradas a seguir.

- Rede Primária: Integração Hidro-Ferro-Rodoviária, utilizando o porto de Capulco como porto de transbordo e a cidade de La Dorada como centro de transferência, apontada na tabela 4.
- Rede Secundaria: Integração Hidro-Rodoviária, com porto de transbordo em Barrancabermeja, mostrada na tabela 5.

2.5 Demanda

A demanda de transporte intermodal de contêineres no Corredor Central, que potencialmente podem ser mobilizados pela via intermodal fluvial-

terrestre, apresentaram cifras de 65000 TEU's no ano de 1995 e de 150000 TEU's para o ano 2000, como mostra a figura 2. É claro que uma previsão ao respeito depende de múltiplos fatores, mais sem dúvida esta cifra poderia aumentar significativamente na medida que se estimule o uso do contêiner, diminuindo assim os preços do transporte, a eficiência na sua entrega, etc., como pode suceder com a implementação e desenvolvimento do transporte multimodal pelo rio Magdalena.

3. METODOLOGIA

Feita a caracterização do sistema, isto é, a definição dos parâmetros e variáveis que intervêm, bem como as restrições ou limitações para a situação em estudo, assim como também foi necessário levantar informações sobre a demanda, corresponde agora escolher a técnica para a simulação do sistema de transporte intermodal pelo corredor central.

Simulação de sistemas é uma técnica que pode ser definida como o processo de projetar um modelo a partir de um sistema real e conduzir experimentos com este modelo com o propósito do entendimento do comportamento do sistema e/ou avaliar varias estratégias para a operação do sistema. É uma ferramenta que permitirá ao analista tirar conclusões sobre novos sistemas sem precisar construí-los, ou fazer alterações em sistemas já existentes sem perturbá-los.

Ao longo do tempo, muitas foram as técnicas desenvolvidas para a simulação de sistemas discretos e contínuos. A simulação de sistemas contínuos permite fazer avaliações de sistemas econômicos, mercadológicos e etc., mais informação em Gordon, G., em *Systems Simulation*. 1978.

As técnicas de modelagem e simulação de sistemas discretos, utiliza os conceitos de probabilidades envolvidos na simulação, tais como a geração de números aleatórios, as principais distribuições de intervalos entre chegadas e tempos de atendimento, a geração de valores dessas funções e a análise das respostas obtidas pela aplicação da técnica de simulação. Para um sistema de transporte intermodal, emprega-se a simulação de eventos discretos.

A literatura mostra varias linguagens criadas para programar a simulação de diversos tipos de sistemas. Para os sistemas discretos, a que mais se destacou no passado foi a linguagem GPSS - "General Purpose System Simulation". No entanto, algumas linguagens de última geração como o SIMAN, base do *software* ARENA, escolhido para o presente estudo, desenvolvido por Zeigler em 1976, para sistemas contínuos e discretos, facilitou o trabalho da construção do modelo e de seu uso experimental para o estudo do problema.

A metodologia a ser empregada neste estudo tem como base o processo de simulação, descrito a seguir:

- Definição do problema;
- Definição do sistema e formulação do modelo;
- Especificação das condições de contorno;
- Dados de entrada;
- Tradução do modelo em linguagem SIMAN (programa ARENA);
- Experimentação, verificação e validação do modelo simulado;
- Animação do modelo;
- Análise das saídas da simulação;
- Documentação e implementação dos resultados.

Após a definição e compreensão completa do problema a ser estudado,

deve-se planejar o projeto verificando a existência de recursos físicos, humanos e técnicos para a execução do projeto.

Em seguida, define-se o sistema a ser modelado através de técnicas de simulação, montando-se um primeiro esboço conceitual do modelo, apontando-se todas as hipóteses e simplificações assumidas, bem como especificando-se as medidas e os resultados que se deseja obter do processamento do modelo, através de um projeto preliminar do experimento.

A próxima fase é a identificação dos dados necessários para o processamento do modelo, dados estes extraídos da caracterização do sistema e submetidos a análises estatísticas para que o modelo represente bem a realidade. É comum após a coleta, o tratamento e a análise dos dados de entrada, ocorrer a modificação conceptual do modelo do sistema a ser simulado, isto se deve ao fato de os dados de entrada revelarem novas características do sistema que não estavam sendo abordadas ou novas hipóteses/simplificações a serem assumidas.

Na Tradução do modelo em linguagem SIMAN utiliza-se o *software* ARENA de simulação no qual o modelo será formulado, realizando-se a codificação do mesmo, seguindo uma lógica de controle. Elaborada a estruturação do modelo na linguagem de simulação parte-se então para a verificação, onde se assegura que o modelo proceda da maneira como foi projetado, e sua validação, onde se garante que o modelo se comporte do mesmo modo que o sistema real. Como pre-requisitos para a verificação e validação temos o uso da animação e os mesmos dados do modelo.

A experimentação e análise de sensibilidade e a análise e interpretação das

saídas são as fases de efetiva aplicação do modelo de simulação como ferramenta de análise e dimensionamento de sistemas logísticos. A fase final é muito importante pois permite o entendimento da modelagem que foi utilizada (documentação), bem como a melhoria de desempenho do sistema com a implementação dos resultados obtidos.

4. O MODELO DE SIMULAÇÃO

O modelo operacional, conforme mencionado, foi desenvolvido em linguagem SIMAN utilizando o *software* ARENA. Será mostrado a continuação as considerações relevantes na construção do modelo.

O modal rodoviário foi simulado supondo uma serie de viagens para o transporte de contêineres até o terminal rodo-ferroviário. Neste caso o interesse não é mostrar o dimensionamento da frota, considerando uma alta demanda de veículos na região, e sim a dificuldade no balanceamento de fluxo de carga entre os modais, o modelo estará assumindo uma taxa de chegada dos caminhões ao terminal segundo uma distribuição exponencial, ao invés de estar controlando o ciclo de viagem completo por caminhão. A distribuição utilizada é representativa de um processo de chegada de eventos independentes. Já para os modais ferroviários e hidroviário, as viagens estarão sendo simuladas por completo (ida, volta e transbordo), pois o número de composições e embarcações é fixo, e o desempenho operacional das mesmas influenciarão no atendimento ou não da demanda prevista de transporte.

Gerados os veículos, estes são enviados para os terminais de destino utilizando as distâncias e velocidades médias reais do sistema. Chegando aos

terminais os veículos entram em fila para seu atendimento, medindo-se os tempos entre a chegada ao terminal e a efetiva alocação dos mesmos. O tempo de fila de espera vai depender da capacidade operacional do terminal e do número de veículos chegando ao terminal para serem atendidos. Os tempos de carregamento e descarregamento nos terminais, são calculados levando-se em consideração a taxa média de operação de transbordo de cada terminal (TEU's/hora) e a capacidade de cada veículo, seja caminhão, trem ou embarcação.

Para a exemplificação da metodologia desenvolvida, foi simulada a Alternativa 1, tabela 4, Integração Hidro-Ferro-Rodoviária, utilizando o porto de Capulco como porto de transbordo e a cidade de La Dorada como centro de transferência. A codificação do modelo para o transporte intermodal desta opção pode ser vista na figura 3. O ARENA possui também uma interface gráfica de animação que permite o acompanhamento de cada sequência lógica da operação do modelo em tempo real, auxiliando a sua compreensão e sua verificação. A figura 4 ilustra a animação do sistema Hidro-Ferro-Rodoviária entre a cidade de Bogotá e o porto de Cartagena.

Alguns dados de entrada devem ser fornecidos ao modelo, para garantir a reprodução real do mesmo. Esses dados estão listados a seguir:

Modal Rodoviário:

- Intervalo de chegada dos caminhões ao terminal: distribuição exponencial, com média 17 min;
- Distância entre Bogotá e terminal rodo-ferroviário: 173 Km - Tabela 4;
- Velocidade média: 27,9 Km/h - Tabela 2;
- Capacidade de cada caminhão: 1 TEU.

Terminal Rodo-Ferroviário

(La Dorada):

- Capacidade máxima de estocagem: 200 TEU's;
- Estoque no início da simulação: 30 TEU's;
- Taxa de operação de transbordo: 4 TEU's/Hora.
- Horário de operação: 24 horas.

Modal Ferroviário:

- Distância entre Barranca e terminal ferro-hidroviário: 403 Km - Tabela 4;
- Velocidade média: 17 Km/h - Tabela 3;
- Capacidade de cada composição: 30 TEU's.

Terminal Ferro-Hidroviário (Capulco):

- Capacidade máxima de estocagem: 300 TEU's;
- Estoque no início da simulação: 50 TEU's;
- Taxa de operação de transbordo: 4,17 TEU's/Hora.
- Horário de operação: 24 horas.

Modal Hidroviário:

- Distância entre os terminais de Capulco e Cartagena: 510 Km - Tabela 4;
- Velocidade média das embarcações: 12 Km/h a montante e 16 Km/h a jusante;
- Capacidade de carga por embarcação: Tabela 1.

Terminal de Cartagena:

- Taxa de operação de Descarregamento: 8 TEU's/Hora.
- Horário de operação: 24 horas.

Assumindo-se os parâmetros acima, buscou-se através da variação entre os diferentes tipos de embarcações, a frota de trens e a taxa de chegada dos caminhões, saber a influência no fluxo/balanceamento dos modais. A tabela

6 indica os experimentos realizados e os resultados obtidos simulando a Alternativa intermodal 1, entre a cidade de Bogotá e o porto de Cartagena.

Os dados de saída do modelo são o total de veículos por modal que passaram pelos terminais, total de TEU's transportados, capacidade média dos terminais, tempos médios de fila, e tempo médio de viagem redonda.

Tendo em mãos os dados de tamanho de frota, distâncias percorridas e tempos de viagem redonda, pode-se calcular através de planilhas apropriadas, os custos de transporte. Para isso, adotou-se também uma exemplificação da metodologia apresentada para a hidrovia, seguindo os valores comerciais dos fretes por cada TEU transportado para cada modal e em cada trecho já referido, incluindo-se os valores de transbordo, seguro e a taxa da utilização dos cais. Com estes dados foi calculado para cada cenário simulado a conta total do frete, que é produto do total de TEU's transportado por cada modal num período inicial de 30 dias. A tabela 7 mostra o custo do transporte intermodal para cada uma das opções simuladas.

5. CONCLUSÕES E EXTENSÕES

As atividades desenvolvidas até agora demonstram a potencialidade de utilizar uma linguagem de simulação probabilística como uma ferramenta de auxílio no dimensionamento de frotas e capacidades de terminais, tendo como meta a minimização dos custos envolvidos.

O modelo de simulação desenvolvido permitiu integrar e interrelacionar os modais hidroviário, ferroviário e rodoviário num só sistema de transporte de containers pelo Corredor

Central utilizando o rio Magdalena como eixo principal.

Analisando-se os resultados das tabelas vemos que as linhas indicadas em "negrito" correspondem as melhores combinações, para cada tipo de embarcação, entre a faixa restrita de testes realizados e que atingiu satisfatoriamente a demanda (2416,67 TEU's/mês) entre os três modais. Em relação ao análise de custos observa-se que a embarcação tipo BR-90 (88 TEU's) ofereceu o menor custo de transporte, \$564.000 por TEU transportado, o que reafirma a tese que quanto maior seja a quantidade de carga transportada pela embarcação, menor será o custo por TEU/Km.

Vale a pena enfatizar que o modelo permite dimensionar de forma realista e estratégica um sistema intermodal de transportes, levando em consideração aspectos operacionais relevantes. Mas, contudo para um dimensionamento "ótimo" da frota dever-se estudar um número muito maior de cenários ou alternativas. Portanto os experimentos representados aqui como resultados tem como objetivo ilustrar o potencial da metodologia, sem querer estabelecer regras ou parâmetros para o dimensionamento "otimizado" do sistema em estudo.

O desenvolvimento deste trabalho continua com a incorporação no modelo de simulação da Alternativa 2, integração hidro-rodoviária, com porto de transbordo em Barrancabermeja, a fim de entender o comportamento operacional completo do sistema Corredor Central e estabelecer comparativos entre estas duas opções intermodais, visando sempre o custo mínimo de transporte e o atendimento da demanda.

6. BIBLIOGRAFIA

- Estudio MITCH sobre el Río Magdalena, NEDECO e MOPT, 1973
- Estudio de Transporte en el área del Río Magdalena, *Netherland Economic Institute*.. Volume 1 e 2, 1974
- MATAALLANA R, Agosto; Estudio de Factibilidad para Transporte Intermodal por el Río Magdalena, 1995
- Estudio Plan Maestro de Transporte. Ministerio de Transporte. Tomo III, Modo Férreo, 1994
- Gordon, G.; *Systems Simulation*, 1978
- Pedgen, C. D. et alii ; Introduction to Simulation Using SIMAN, McGraw-Hill, 1995

ANEXOS: TABELAS E FIGURAS

Tabela 1 - Carga Máxima de TEU's por Tipo de Embarcação e Trecho do Rio

Trecho	Quantidade de TEU's				
	BR-40*	BR-50**	BR-70**	BR-80*	BR-90**
Cartagena - Capulco	39	44	70	80	88
Cartagena - Barranca	39	44	70	80	88
Cartagena - Puerto Berrio	23	26	38	44	48
Cartagena - Puerto Salgar	16	19	27	32	34

* Embarcações do tipo Chata

** Embarcações de Porão Aberto (hooper)

Tabela 2 - Subsistema Rodoviário, Características Físicas

Trecho	Distância	Velocidade
	Km	Km/h
La Dorada-Bogota	173	27,9
La Dorada-Armenia	246	31,66
La Dorada-Cali	433	34,64
Barranca-Bogota	448	23,03
Barranca-Medellin	300	?
Barranca-Bucaramanga	110	28,57
Barranca-Armenia	521	26,4

Tabela 3 - Subsistema Ferroviário, Características Físicas

Trecho	Distância	Velocidade
	Km	Km/h
Capulco-Pto Berrio	259	17
Capulco-La Dorada	403	17
Capulco-Medellin	441	16
PtoBerrio-Medellin	182	15

Tabela 4 - Alternativa 1 : Conexão Intermodal com o Porto de Capulco

Alternativa 1 - Conexão Intermodal com o Porto de Capulco							
Origem/ Destino	Modo						
	HIDROVIÁRIO		FERROVIÁRIO		RODOVIÁRIO		Total Km
	Tramo	Km	Tramo	Km	Tramo	Km	
Bogotá	Cartagena - Capulco	510	Capulco - La Dorada	403	La Dorada - Bogotá	173	1086
Armenia					La Dorada - Armenia	246	1159
Cali					La Dorada - Cali	433	1346
Medellín			Capulco - Medellín	460		970	

Tabela 5 - Alternativa 2 :Conexão Intermodal com o Porto de Barrancabermeja

Origem/ Destino	Modo				Total Km
	HIDROVIÁRIO		RODOVIÁRIO		
	Tramo	Km	Tramo	Km	
Bogotá	Cartagena - Barranca	654	Barranca - Bogotá	448	1102
Medellín			Barranca - Medellín	300	954
B/manga			Barranca - B/manga	115	769
Armenia			Barranca - Armenia	521	1175

00010

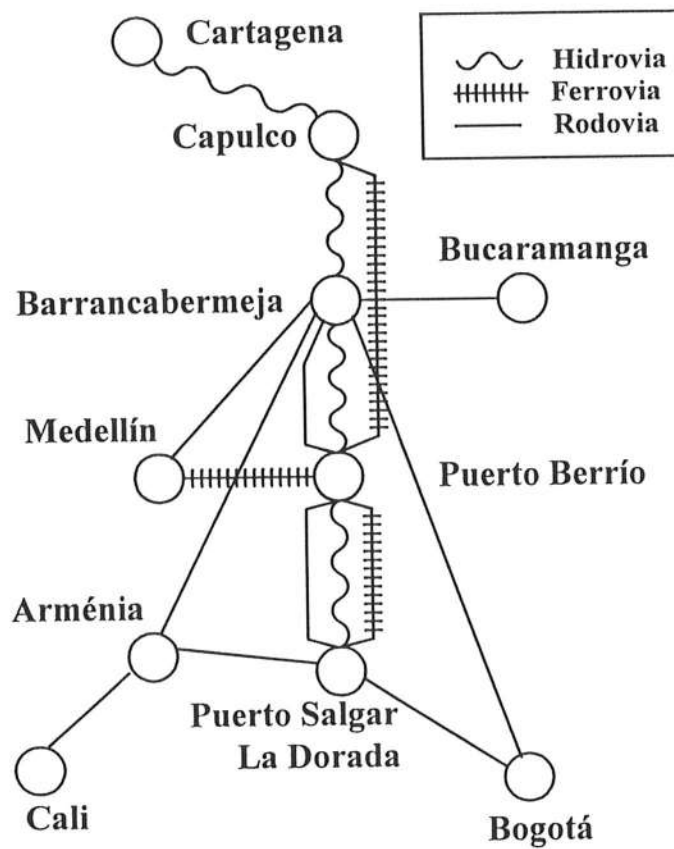


Figura 1 - Rede Intermodal do Corredor Central

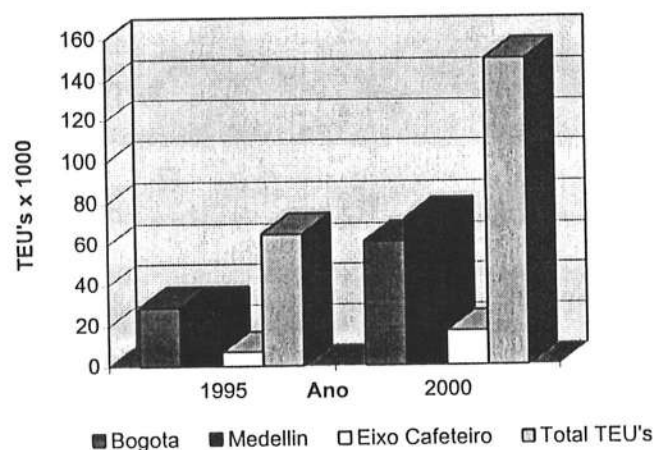


Figura 2 - Movimento Estimado de TEU's no Corredor Central

Tabela 7 - Custo Total do Transporte Intermodal no Período Simulado

Modal Rodoviário				Term.Rodo-Ferro.			Modal Ferroviário			Term.Ferro-Hidro.			Modal Hidroviário			
Número	Custo	Frete	Viagens	Custo	Transbordo	Custo	Número	Custo	Frete	Custo	Transbordo	Custo	Capac.	Embarc.	Número	Custo
Viagens							Viagens								Viagens	Frete
2463	387.922,5		77	98.520,0		277.200,0	77	92.400,0	677.040,0	2418		1.434.562,5	39 TEU's		2418	628,3
2463	387.922,5		77	98.520,0		277.200,0	77	92.400,0	665.500,0	2420		1.423.022,5	44 TEU's		2420	623,0
2340	368.550,0		78	93.600,0		280.800,0	78	92.400,0	606.900,0	2380		1.348.650,0	70 TEU's		2380	601,7
2464	388.080,0		78	98.560,0		280.800,0	78	92.400,0	571.200,0	2400		1.332.480,0	80 TEU's		2400	590,2
2464	388.080,0		78	98.560,0		280.800,0	78	92.400,0	542.080,0	2464		1.303.360,0	88 TEU's		2464	564,0

Modal Hidroviário

Terminal ferro-hidroviário

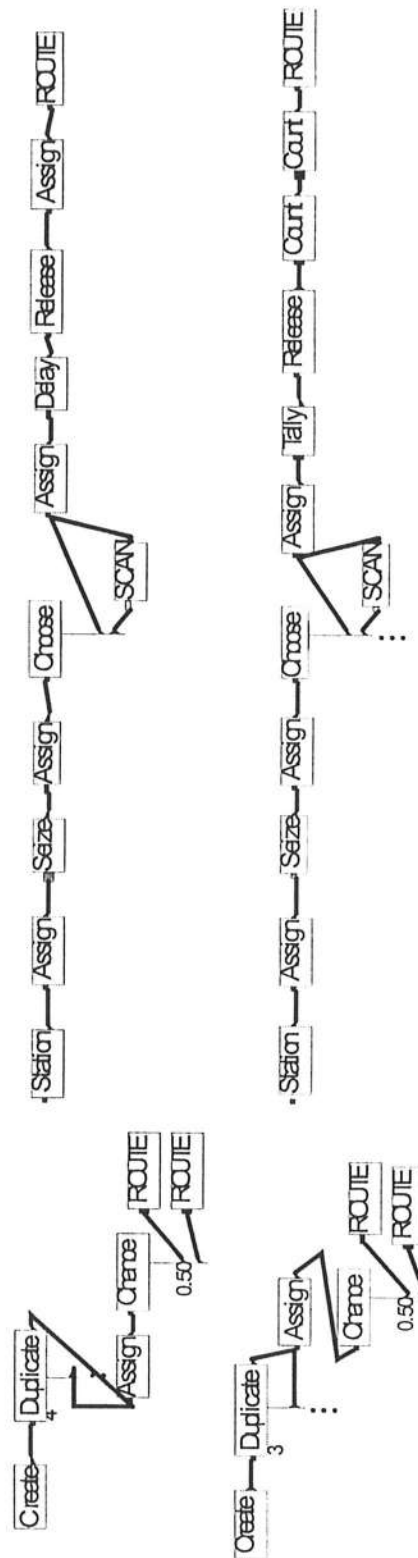


Figura 3 - Codificação Modal hidroviário e Terminal Ferro-hidroviário

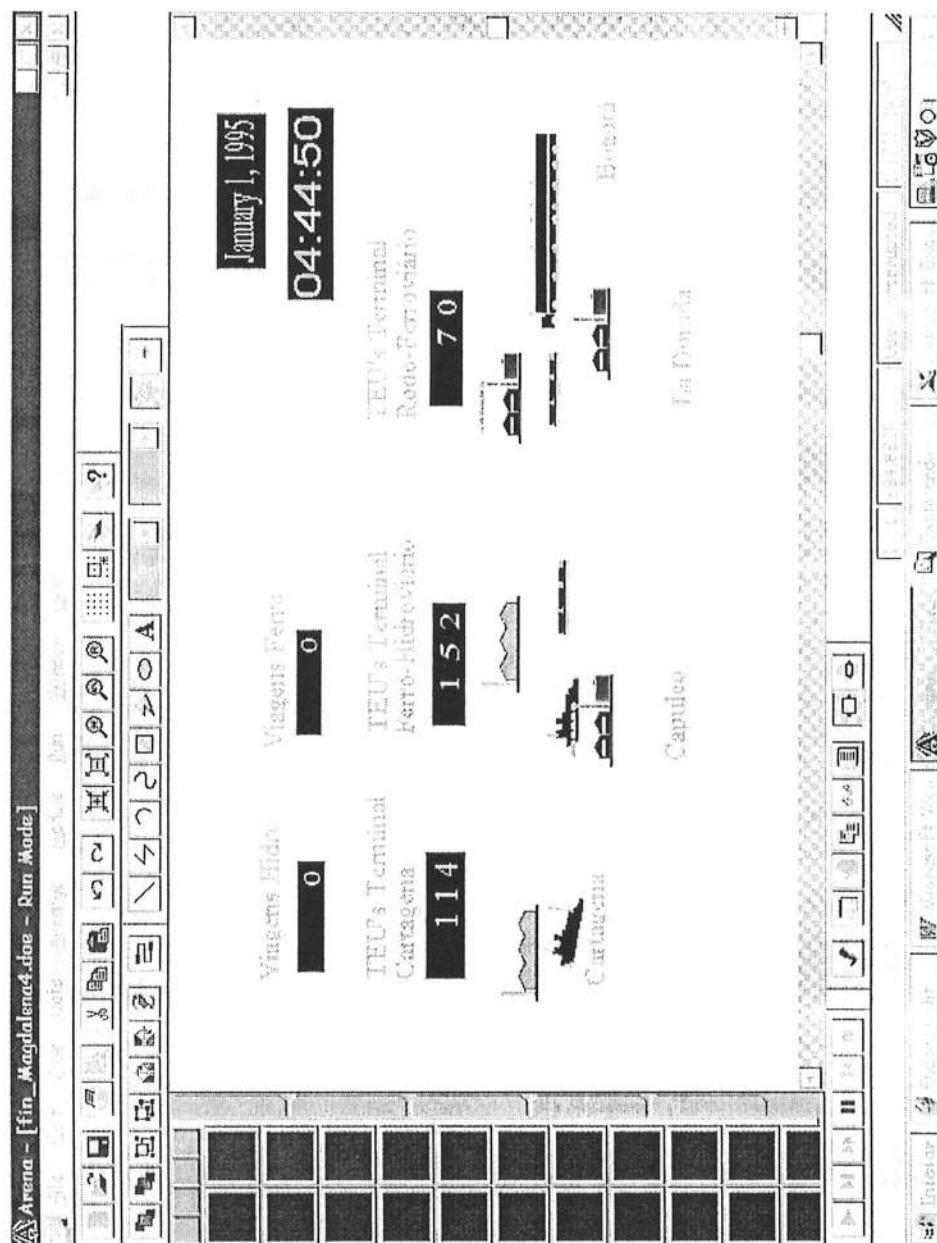


Figura 4 - Tela de Animação sistema Hidro-Ferro-Rodoviária (Bogota-La Dorada-Capulco-Cartagena)



INVESTIGAÇÃO ANALÍTICO-NUMÉRICA SOBRE A DINÂMICA DE TUBOS VERTICALMENTE SUBMERSOS SUJEITOS A AÇÃO DO FENÔMENO DE VIBRAÇÃO INDUZIDA PELA VORTICIDADE - V.I.V.

A.L.C.Fujarra & C.P.Pesce

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

Brasil - Fax: +55-11-8185717

e_mail: ceppesce@usp.br

R.Francis

Petróleo Brasileiro S.A.

Resumo

Um tubo disposto verticalmente, tensionado e sob a ação de seu próprio peso foi estudado segundo o Modelo de Iwan-Blevins/Lyons-Patel para a predição das Amplitudes Modais advindas da ação do Fenômeno de Vibração Induzida pela Emissão de Vórtices - V.I.V.. Alguns casos, com pré-tensões diferentes e perfis de correnteza constantes ou linearmente variáveis, foram analisados através da implementação de uma rotina em código MatLab. Foram obtidos resultados de RMS de Tensão, os quais puderam ser comparados com aqueles respectivamente obtidos quando no processamento do código "Shear7"^(*). Este trabalho possibilitou a comprovação da consistência do modelo adotado pela EPUSP, em relação ao empregado pelo "Shear7", quando em perfil de velocidade constante.

1. O Modelo de Iwan-Blevins/Lyons-Patel

O Fenômeno de Vibrações Induzidas por Emissão de Vórtices - VIV, responsável pela dinâmica auto-excitada e auto-regulada de estruturas com alta razão de esbeltez, é de grande complexidade, representando uma importante classe de problemas de fluido-elasticidade, em particular o fenômeno de "*lock-in*" que pode ser traduzido como a sincronia da

frequência de emissão de vórtices, e portanto da variação da força de sustentação, com uma das frequências naturais da estrutura. Vem desta sincronia o comportamento de auto-excitação.

No entanto, à medida em que aumentam as amplitudes de oscilação, o padrão do escoamento é destruído, o que acaba por provocar um comportamento de auto-regulação da resposta.

Tais comportamentos dinâmicos são usuais em osciladores não lineares do tipo Van der Pol. A descrição detalhada e o modelamento do fenômeno podem ser encontrados, por exemplo, em Aranha e Parra (1996).

Cumprе mencionar que, ao nível internacional, a abordagem numérica mais completa do problema encontra-se ainda em fase embrionar, porquanto requer a solução do problema de escoamento e sua interação com a estrutura em números de Reynolds relativamente elevados e com considerações acerca da interação tridimensional (ao longo da estrutura).

À luz destes fatos é de se esperar que modelos analíticos, embasados em hipóteses que tornem sua solução mais rápida sem contudo privar-se da reprodutibilidade e consistência, venham há algum tempo tomando força e credibilidade. É a este contexto que se incorpora o Modelo de Iwan-Blevins/Lyons-Patel, mostrando-se capaz de predizer, com razoável aproximação, as

^(*) O programa Shear7 foi processado no CENPES/PETROBRAS

amplitudes do movimento devido a este fenômeno.

O Modelo de Iwan-Blevins, posteriormente complementado por importantes considerações propostas por Lyons & Patel, é caracterizado como um sistema de duas equações, sendo para tanto assumida a hipótese de sincronização dos vórtices ao longo de toda a estrutura. Posteriormente, com a consideração de uma função $s_n(x)$, mais adiante descrita, esta distribuição longitudinal dos vórtices é melhor considerada.

A primeira das equações deste modelo responde pela dinâmica do oscilador fluido associado ao fenômeno, caracterizando-se como uma equação do tipo Van der Pol, onde podem ser notados suas características auto-excitadora e auto-reguladora. Por outro lado, a segunda equação procura descrever o oscilador elástico, ou seja a dinâmica da estrutura submetida à ação do fenômeno de VIV. Vem daí portanto a condição hidroelástica, destacando-se como elemento de acoplamento destas duas equações a *Força de Sustentação* $f_L(x,t)$, que de acordo com a teoria de fólios pode ser representada como:

$$f_L(x,t) = \alpha_4 \left(\frac{\partial w}{\partial t} - \frac{\partial y}{\partial t} \right) \quad (1.1)$$

onde $w = w(x,t)$ refere-se a uma variável "fictícia" responsável pela descrição do movimento do fluido e $y = y(x,t)$ refere-se à descrição do deslocamento transversal ao escoamento de cada ponto da estrutura.

Deste modo o sistema de equações acima descrito pode ser matematicamente apresentado, conforme Martins(1994), como :

$$\frac{\partial^2 w}{\partial t^2} - \left[\alpha_1 - \alpha_2 \left(\frac{\partial w}{\partial t} \right)^2 \right] \frac{\partial w}{\partial t} + \omega_s^2 w = \alpha_3 \frac{\partial y}{\partial t} \quad (1.2)$$

$$\frac{\partial}{\partial x^2} \left(EI \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \right) - \frac{\partial}{\partial x} \left(F_x \frac{\partial y}{\partial x} \right) + c \frac{\partial y}{\partial t} + m \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = \alpha_4 \left(\frac{\partial w}{\partial t} - \frac{\partial y}{\partial t} \right) \quad (1.3)$$

Assumindo-se então a usual técnica de decomposição modal é possível obter um conjunto de n equações desacopladas, cada qual referindo-se a um determinado modo natural de vibrar e apresentando a seguinte forma:

$$\frac{d^2 Y_n}{dt^2} + 2\zeta_n^t \omega_n \frac{dY_n}{dt} + \omega_n^2 Y_n = \frac{\alpha_4}{v_n} \frac{dW_n}{dt} \quad (1.4)$$

para as quais a *Amplitude Modal* (A_n) pode ser escrita como:

$$A_n = DF_n \gamma_n \quad (1.5)$$

onde:

1) (D) refere-se ao diâmetro externo da estrutura cilíndrica submetida ao fenômeno;

2) (F_n) é um *Fator Adimensional de Amplificação Modal* dependente da *Massa Efetiva Modal Reduzida* (μ_n^r) e do *Amortecimento Crítico Modal* (ζ_n^s), na forma:

$$F_n = \frac{1}{1 + 9.60(\mu_n^r \zeta_n^s)^{1.80}} \quad (1.6)$$

com a *Massa Efetiva Modal Reduzida* (μ_n^r) dada por:

$$\mu_n^r = \frac{4v_n}{\rho_a \pi D^2} \quad , \quad (1.7)$$

e o *Amortecimento Crítico Modal* (ζ_n^s) por:

$$\zeta_n^s = \zeta_n^l + \frac{2}{3\pi} \left\{ \int_0^L c_d \rho_a D^2 [1 - s_n(x)] |\varphi_n^3(x)| dx \right\} / \left\{ \left[\int_0^L m(x) \varphi_n^4(x) dx \right]^{1/2} \left[\int_0^L m(x) \varphi_n^2(x) dx \right]^{1/2} \right\} \quad (1.8)$$

e onde (v_n) corresponde à *Massa Efetiva Modal*, abaixo definida.

$$v_n = \frac{\int_0^L m(x) \varphi_n^2(x) dx}{\int_0^L s_n(x) \varphi_n^2(x) dx} \quad (1.9)$$

Na expressão acima: $m(x)$ refere-se à distribuição longitudinal de massa, incluindo massa adicional; $\varphi_n(x)$ é o auto-vetor do n -ésimo modo, $s_n(x)$ é uma função capaz de considerar apenas o trecho longitudinal da estrutura onde está havendo excitação do n -ésimo modo, ou seja, esta função vale 1 nos trechos de excitação e 0 nos demais. Por sua vez, ω_n refere-se à frequência natural do n -ésimo modo; C_d é o coeficiente de arraste e ρ_a é a densidade do fluido em escoamento ao redor da estrutura.

3) (γ_n) é um *Fator de Forma*, função da distribuição de massa, caracterizado como:

$$\gamma_n = I_n^{-1/2} = \left[\frac{\int_0^L m(x) \varphi_n^4(x) dx}{\int_0^L m(x) \varphi_n^2(x) dx} \right]^{-1/2} \quad (1.10)$$

Baseando-se em resultados experimentais, Lyons & Patel em 1986 propuseram ainda um terceiro multiplicador à *Amplitude Modal*. (A_n)

Este índice, denominado de *Fator de Redução Modal* (ψ_n) , mostra-se dependente da *Velocidade Reduzida* (V_r) :

$$V_r = \frac{2\pi U}{\omega_n D}, \quad (1.11)$$

sendo dado graficamente pela figura abaixo:

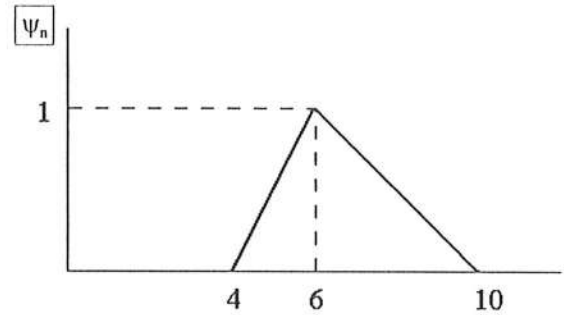


Figura 1.1: Fator de Redução ψ_n

e matematicamente por:

$$\psi_n = \begin{cases} 0 & \text{para } V_r \leq 4 \\ \frac{V_r - 4}{2} & \text{para } 4 < V_r \leq 6 \\ \frac{10 - V_r}{4} & \text{para } 6 < V_r \leq 10 \\ 0 & \text{para } V_r > 10 \end{cases} \quad (1.12)$$

Finalmente pode-se estabelecer então que a *Amplitude Modal* seja determinada por:

$$A_n = DF_n \gamma_n \psi_n \quad (1.13)$$

2. Análise Modal de um Tubo Vertical Tensionado e sob a Ação de seu Próprio Peso

O presente item trata da análise de uma estrutura tubular e bastante esbelta, imersa e sob a ação de um perfil de correnteza constante ou linearmente variável, suportada de forma vertical como mostrado na figura 2.1. Trata-se de uma configuração estrutural cuja simplicidade

permite a verificação dos procedimentos adotados de uma forma analítica. Pretende-se portanto, comparar os resultados do Modelo de Iwan-Blevins/Lyons Patel quanto a predição do Fenômeno de VIV, fazendo uso de um caso com solução modal analiticamente determinado, com os resultados numéricos advindos do processamento do código "Shear7". O objetivo ulterior da presente pesquisa será, uma vez validado o modelo, aplicá-lo a casos que apresentem curvatura, como o de um "*Steel Catenary Riser*", através de implementação do procedimento no código computacional ora em desenvolvimento na EPUSP. Para estas configurações, o problema de auto-valor associado é determinado numericamente.

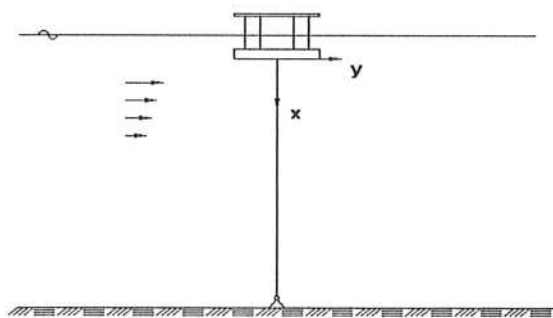


Figura 2.1 Esquema Estrutural em Análise

Os efeitos de onda serão desconsiderados, assim como negligenciando os efeitos da curvatura estática na Equação Estrutural de Euler. É possível mostrar, no entanto, que o efeito da *Rigidez Flexional* fica restrito ao entorno das extremidades vinculadas, em uma região de comprimento da ordem $(\lambda(x)/L = (\sqrt{EI/T(x)})/L)$, denominado *Comprimento de Flexão*. Na realidade a Rigidez Flexional volta a ser importante para modos naturais de vibrar de ordem elevada, quando o semi-comprimento de onda local a ele associado é comparável a $\lambda(x)$. Assim, assumindo que a dinâmica global da linha seja dominada pela Rigidez

Geométrica (ou de Tração $T(x)$), a equação de um fio sob tração linearmente variável rege o fenômeno.

$$m \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} - \frac{\partial}{\partial x} \left(T(x) \frac{\partial y}{\partial x} \right) = 0 \quad (2.1)$$

onde: $T(x) = T_0 + \gamma_{ef}(L - x)$, sendo T_0 a tração no fundo e γ_{ef} o peso linear efetivo submerso.

Assumindo-se solução homogênea, utilizando-se a técnica de separação de variáveis, e com algum esforço algébrico, a equação modal associada a 2.1 pode ser posta na forma da *Equação de Bessel Modificada* dada por:

$$\eta^2 \varphi_n''(\eta) + \eta \varphi_n'(\eta) + 4\beta^2 \eta^2 \varphi_n(\eta) = 0, \quad (2.2)$$

onde:

$$\eta = \left[1 + \frac{\gamma_{ef}(L - x)}{T_0} \right]^{1/2} \quad (2.3)$$

À equação 2.3, sob as condições de contorno apropriadas ao presente caso, corresponde a *Equação Característica*:

$$Y_0(2\beta)J_0(2\beta\eta_0) - Y_0(2\beta\eta_0)J_0(2\beta) = 0 \quad (2.4)$$

cujos autovalores são dados por:

$$\lambda_n = \frac{\gamma_{ef}}{\sqrt{T_0 m}} \beta_n \quad (2.5)$$

e os respectivos autovetores por:

$$\varphi_n(x) = J_0 \left[2\beta_n \left(1 + \frac{\gamma_{ef}}{T_0} (L - x) \right) \right]^{1/2} - \frac{J_0(2\beta_n)}{Y_0(2\beta_n)} Y_0 \left[2\beta_n \left(1 + \frac{\gamma_{ef}}{T_0} (L - x) \right) \right]^{1/2} \quad (2.6)$$

Sabendo-se ainda que a *Amplitude da Curvatura Modal* $\chi_n(x)$ pode ser expressa como o produto da *Amplitude Modal* (A_n) pela segunda derivada em x do n -ésimo modo natural $\varphi_n(x)$, ou seja:

$$\chi_n(x) = A_n \cdot \frac{\partial^2 \varphi_n(x)}{\partial x^2}, \quad (2.7)$$

e como a *Amplitude da Deformação Modal no Exterior do Tubo* ($\varepsilon_n(x)$) é dada por:

$$\varepsilon_n(x) = \frac{D}{2} \chi_n(x) \quad (2.8)$$

pode-se, a partir daí, obter a *Amplitude da Tensão Modal* (σ_n) ao longo da estrutura cilíndrica, e portanto avaliar a Vida Útil em Fadiga devido ao Fenômeno de VIV, sob o modelo de Palmgren-Miner.

3. Implementação do Modelo em Código MatLab

3.1 Hipóteses Assumidas

Iniciando-se pela *Rigidez Flexional*, uma prévia adimensionalização da Equação Estrutural de Euler mostrou a pouca influência deste parâmetro na dinâmica da estrutura. Deste modo o equacionamento do oscilador elástico se caracteriza como descritivo de um cabo, onde somente a tração linearmente variável com a profundidade e devida ao próprio peso responde pela sua dinâmica.

Sabe-se que o *Número de Strouhal* (S) tem pouca variação em uma grande faixa de *Número de Reynolds* (R_e), faixa esta que compreende os casos em análise. Como valor típico o modelo de Iwan-Blevins/Lyons-Patel adota $S=0,2$ como representativo de seções circulares, no entanto, adotou-se o mesmo valor utilizado no processamento do “Shear7”, objetivando-se com isso estabelecer uma base consistente de comparação. É importante salientar que os resultados do “Shear7” já eram conhecidos antes da

elaboração deste trabalho, justificando-se daí a adoção de outros parâmetros, que não os típicos do referido modelo.

Apesar de, baseado em inferências experimentais, Patel propor uma faixa de “*Lock-in*” dada por uma *Velocidade Reduzida* (V_r) variando de 4 à 10, com um máximo de *Amplitude Modal* em $V_r = 6$, novamente, para garantir a consistência com os resultados anteriormente obtidos com o processamento do “Shear7”, empregaram-se outras faixas. Estas faixas são apresentadas mais adiante, juntamente com o valor de *Strouhal* adotado.

Nos casos de *Perfil de Velocidades Linearmente Variável* com a profundidade, adotou-se um perfil equivalente composto por cinco extratos, cada qual com velocidade constante e igual à média das velocidades no respectivo extrato do perfil original.

Ainda de acordo com a *Velocidade Reduzida*, equação 1.11, e dada a variação de velocidade em alguns casos analisados, evidenciou-se a ocorrência do seguinte fato: a excitabilidade de um mesmo modo natural em mais de um extrato de velocidades, havendo portanto vários valores de *Fator de Redução* (ψ_n) dados por 1.12. Nestes casos considerou-se aquele fator de menor redução da amplitude (maior ψ_n), como sendo representativo do respectivo modo em todos os trechos de sua excitação.

E finalmente, quando na Estimativa da Vida Útil do “*riser*” nas condições analisadas, assumiu-se o *Modo Natural com Maior Dano* como aquele representativo do fenômeno.

3.2 Fluxograma da Implementação

É importante deixar claro que o objetivo da presente implementação não é a elaboração de um programa comercial acabado, e sim de uma rotina que vise a sistematização da metodologia referente ao Modelo apresentado e sua confrontação com resultados provenientes do

processamento do código "Shear7". Fica a cargo do "software", paralelamente desenvolvido, a solução dos casos mais gerais (em "catenária" por exemplo), via teoria de Elementos Finitos, e devendo, este sim, ser considerado como um programa de uso de uso no projeto de estruturas "offshore".

O fluxograma simplificado seguinte, descreve o procedimento tal como foi implementado, através do aplicativo "MatLab-4.2c", para o tratamento do presente problema.

Neste fluxograma, tem-se:

- 1) Características do "riser": dimensões do tubo e propriedades do material;
- 2) Constantes e Condições Ambientais;
- 3) Considerações: tipo de perfil de velocidades, tipo de aproximação modal, número de modos analisados;
- 4) Cálculo das frequências naturais;
- 5) Determinação dos Fatores de Forma e de Amplificação;
- 6) $n = 1$, o primeiro modo natural;
- 7) Cálculo da velocidade modal;
- 8) O perfil de velocidades é Linearmente Variável ?;
- 9) $v = 1$, o primeiro extrato de velocidades;
- 10) Há excitação do modo n ?;
- 11) Próximo extrato: $v = v + 1$;
- 12) Já verificou todos os extratos ?;
- 13) Cálculo do Fator de Redução;
- 14) O modo foi excitado em algum extrato ?;
- 15) Tensão Modal e Dano Modal iguais a zero em todos os pontos da estrutura;
- 16) Seleção do fator que implique em menor redução da Amplitude Modal;
- 17) Cálculo da Amplitude Modal;
- 18) Cálculo da Tensão Modal e do Dano Modal em todos os pontos da estrutura;
- 19) Próximo modo natural: $n = n + 1$;
- 20) Já foram analisados todos os modos naturais ?;
- 21) Busca do modo com maior Dano e Cálculo da Vida Útil e
- 22) Comparação.

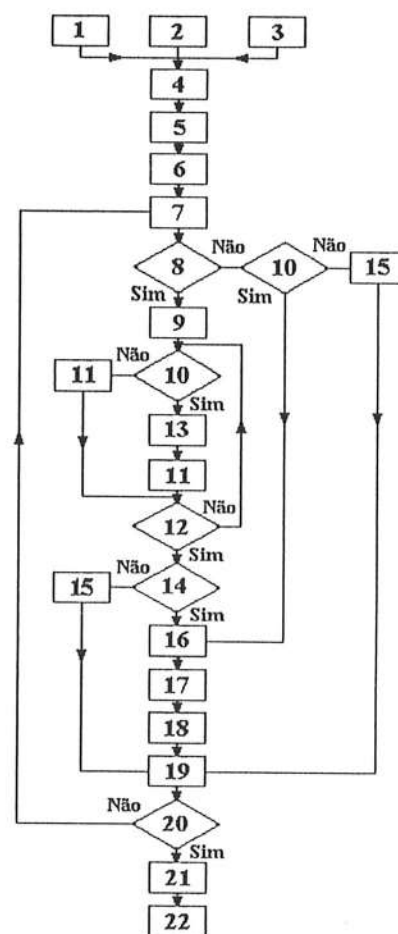


Figura 3.2.1 Fluxograma Simplificado da Implementação

3.3 Descrição da Rotina Implementada

A Rotina "viv.m" tem como objetivo maior a sistematização do procedimento de Estimativa do Vida Útil em Fadiga de um caso padrão de "riser" exposto ao Fenômeno de VIV. Para tanto, sua execução se baseia em três etapas fundamentais. A primeira caracteriza-se como uma etapa de "input", onde os vários casos, cada um a sua vez, são carregados e armazenados para que posteriormente possam servir ao processo de análise. A etapa seguinte portanto, diz respeito a todo o procedimento analítico-numérico de Estimativa da Vida Útil via Modelo de

Iwan-Blevins/Lyons-Patel. Por fim destaca-se uma terceira etapa, segundo a qual os resultados obtidos são graficamente apresentados, bem como comparados com os respectivamente obtidos quando na execução do “Shear7”.

A etapa de “input” é apresentada na forma de 4 telas que, em sendo sucessivamente confirmadas, carregam a rotina com o caso de análise desejado e, portanto, capacitam a Rotina a continuar o procedimento de estimativa e comparação. Vale lembrar que a Rotina aqui descrita já apresenta como “*default*” o caso onde a razão entre a Tração no topo e o Peso Suspenso é 1,2, bem como o Perfil de Correnteza é do tipo constante. Qualquer modificação é passível de incorporação, sendo então assumida como base de análise.

A etapa de “análise” é efetivamente a de maior importância pois traz em seu escopo toda a codificação do Modelo apresentado. Inicialmente realiza-se a busca das Frequências Naturais. Neste ponto é importante destacar que são possíveis duas formas de análise quanto à dinâmica estrutural: uma primeira, mais simples, segundo a qual os Modos Naturais são aproximados por senóides e uma segunda, mais precisa, que faz uso das *Funções de Bessel* para tal aproximação. Feita tal busca, a atividade seguinte é determinar os vários *Fatores de Forma* (γ_n) e de *Amplificação* (F_n) inerentes ao Modelo usado. Terminadas estas duas atividades, torna-se possível a visualização destes resultados parciais referentes às mesmas. Passa-se, em seguida, à fase de análise propriamente dita, basicamente caracterizada pela inicial identificação do tipo de Perfil de Correnteza (constante ou linearmente variável), a partir do qual são determinados os vários *Fatores de Redução* $\psi_n(x)$, seguindo-se então a verificação da excitabilidade ou não de cada Modo Natural, baseada na faixa de “*lock-in*”. Havendo a excitabilidade,

calcula-se, ao longo da dimensão longitudinal da estrutura: a *Amplitude da Curvatura Modal* (χ_n), a *Amplitude da Tensão Modal* (σ_n), o *Número de Ciclos Modal até a Fadiga* (N_n) e o *Dano Modal* ($Dano_n$).

Na etapa de “comparação” pode-se, além de visualizar o *RMS de Tensão* obtidos em ambos os programas, também verificar graficamente as várias Frequências Naturais utilizadas nas análises. A Comparação se faz via RMS de Tensão porque, em se tratando de uma lei exponencial quando na descrição do Número de Ciclos até a Fadiga, qualquer discrepância no cálculo das tensões reflete-se em diferenças amplificadas quanto ao Dano posteriormente calculado.

Basicamente a Rotina “*viv.m*” é apresentada na forma de uma janela padrão “*windows*”, na parte superior da qual é possível a identificação de um menu principal caracterizado pelas seguintes opções:

- “*Preliminares*”: dentro desta opção acham-se listadas 3 (três) sub-opções cada qual referindo-se aos dados de entrada. Desta forma a sub-opção <Tubo Escolhido> abre uma nova janela onde podem ser carregadas as propriedades do tubo utilizado nas análises posteriores; a sub-opção <Propriedades do Material> faz referência às características do material do tubo e a sub-opção <Constantes e Condições Gerais> traz os parâmetros gerais, dentre os quais: a Velocidade da Correnteza e a Aceleração da Gravidade. Ver figura 3.3.1.
- “*Considerações*”: selecionada tal opção abre-se uma janela onde se tem a possibilidade de escolha dos seguintes aspectos: Maneira como os Modos Naturais serão aproximados (por Funções de Bessel ou por Senóides); Tipo de Perfil de Correnteza (Constante

ou Linearmente Variável) e Maneira como os Danos serão contabilizados (Distribuídos ao longo da estrutura ou Concentrados em um único ponto). Confirmadas tais considerações fica sendo possível a determinação da Frequências Naturais bem como todos os Fatores envolvidos com a aplicação do Modelo. Ver Figura 3.3.2.

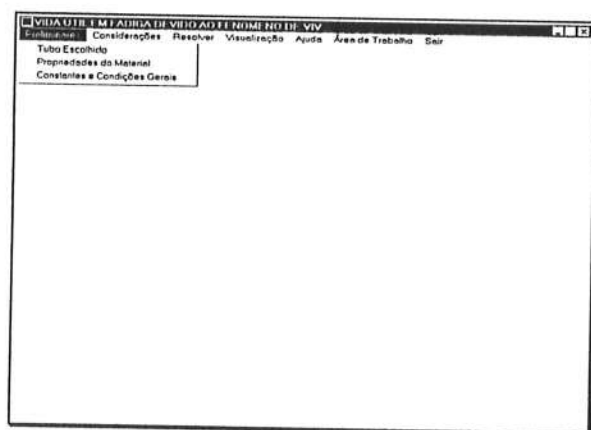


Figura 3.3.1 Tela de Abertura da Rotina "viv.m"

esta sub-opção só é passível de utilização quando referir-se aos casos de 3 à 6 que serão descritos mais adiante. Para efeito de maior entendimento e visualização da descrição acima, segue-se abaixo a Figura 3.3.3, assim como uma descrição mais detalhada do que cada uma das 5(cinco) possíveis sub-opções é capaz de proporcionar:

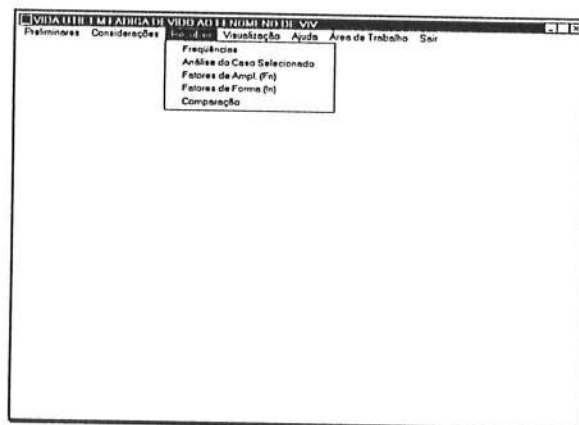


Figura 3.3.3 Sub-Opções do item Resolver do Menu Principal

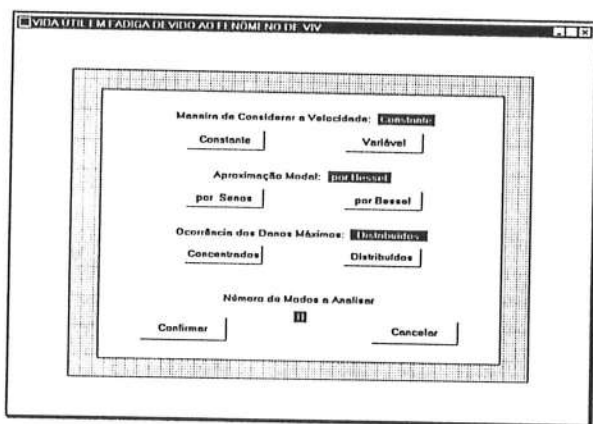


Figura 3.3.2 Item Considerações do Menu Principal

- "Resolver": este item do menu principal incorpora em seu escopo sub-opções que dizem respeito tanto ao cálculo de elementos preliminares e de importância para as análises, bem como a própria análise. Faz parte deste item ainda uma opção de comparação entre os resultados obtidos quando na análise via rotina da EPUSP e os respectivamente obtidos via "Shear7";

<Frequências> onde são calculadas e apresentadas as Frequências Naturais. Nesta sub-opção, independentemente da análise modal via Funções de Bessel ou por Aproximação Senoidal, são apresentados os resultados obtidos com ambas, como também a possibilidade de visualização gráfica dos mesmos, conforme apresentado na figura 3.3.4.

<Fatores de Amplificação F_n > refere-se a apresentação gráfica e na forma de tabela dos resultados deste adimensional para excitação de 20%, 40%, 60%, 80% e 100% da extensão da linha, conforme apresentado na figura 3.3.5.

<Fatores de Forma (f_n)> esta sub-opção apresenta estes fatores de maneira gráfica e na forma de tabela segundo a formulação 1.10, assumido-se distribuição de massa constante. Ver figura 3.3.6;

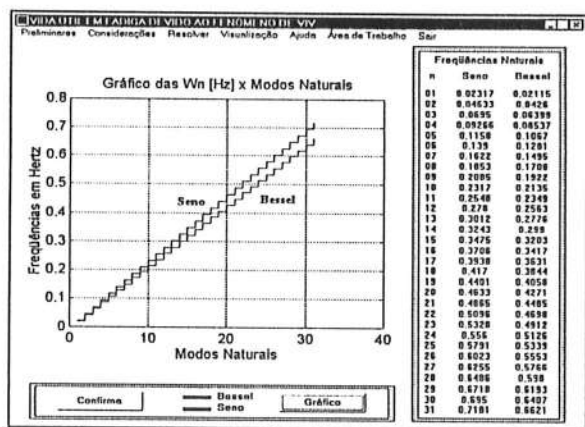


Figura 3.3.4 Tela de Apresentação das Frequências Naturais

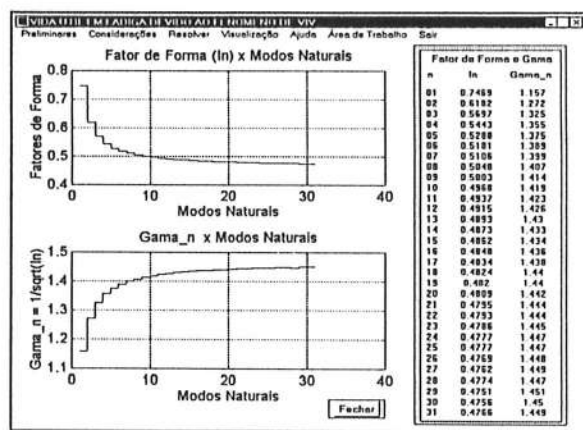


Figura 3.3.6 Tela com os Fatores de Forma (ln) e (γ_n)

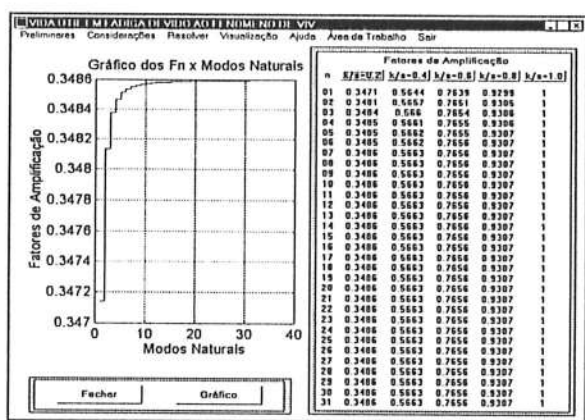


Figura 3.3.5 Tela com os Fatores de Amplificação (Fn)

<Análise do Caso Selecionado> como o próprio nome diz executa a análise do caso selecionado segundo os dados confirmados nos itens: "Preliminares" e "Considerações". <Comparação> segundo a qual torna-se possível a comparação entre resultados obtidos com a presente rotina e os respectivamente obtidos com o "Shear7". A seleção desta sub-opção só é possível quando estiverem sendo analisados os Casos 3, 4, 5 e 6 (mais adiante apresentados). Desta forma, qualquer outro tipo de caso analisado, que não os citados, terá impossibilitada a comparação com o "Shear7", pelo menos via rotina aqui desenvolvida.

- "Visualização": neste item do Menu Principal é possível a visualização dos n ésimos *Modos Naturais*, bem como seus respectivos gráficos de *Amplitude da Curvatura*, ambas escolhas referentes à aproximação dos Modos por *Funções de Bessel* e conseguidas com a seleção da sub-opção <Modos Naturais e Curvaturas>. Ver figura 3.3.7. Este item do Menu Principal apresenta ainda uma sub-opção de Animação do Modo desejado, obtida a partir da seleção do item <Animação>.
- "Ajuda" este item, quando selecionado, presta ao usuário alguns esclarecimentos gerais, além de uma breve descrição das possíveis escolhas de aproximação modal e uma sintética descrição do procedimento básico de utilização da Rotina.
- "Área de Trabalho" como já mencionado, a presente rotina não tem o intuito de se apresentar na forma de um "software" devidamente acabado, mesmo porque a linguagem "MatLab" dificultaria tal intenção. Deste modo, a fase de busca dos autovalores através da *Equação Característica 2.4* se faz de forma não tão expedita, o que acaba por tornar demorada a sua execução a toda hora. Buscando agilizar o processo de análise, implementou-se então as sub-opções de: <Salvar> a área de trabalho,

bem como <Recuperar> a área de trabalho, com as quais fica possível a gravação de um caso analisado ou a recuperação de um anteriormente gravado.

- “Sair” esta opção termina a execução da Rotina.

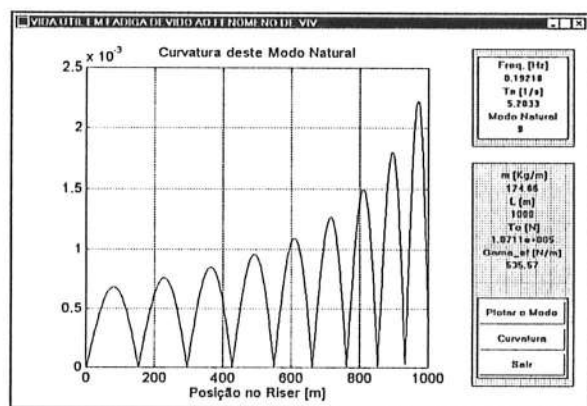


Figura 3.3.7 Tela com a Curvatura para o 9º Modo Natural

4. Comparações

Conforme proposto o intuito original do presente trabalho é o de estabelecer uma base comparativa entre as respectivas rotina de Análise da Vida Útil em Fadiga devido ao Fenômeno de VIV. Para tanto foi proposto um caso padrão de “riser” em condição vertical, portanto com solução analítica conhecida, bem como vários casos para análise do mesmo. Estas condições de análise podem ser compiladas na forma das seguintes tabelas:

Características do Tubo

Tabela 4.1 Características Principais do Tubo

Parâmetros	TUBO 10”3/4
De = diâmetro ext. (m)	0,27305
Di = diâmetro int. (m)	0,23653
t = espessura (mm)	18,26
De/t	14,94
γ_a = peso lin. (N/m)	1124,17
γ = empuxo (N/m)	588,60
γ_{ef} = peso sub. (N/m)	535,57
A = área da seção (m ²)	0,01461615
J = inércia transv. (m ⁴)	0,119215E-03

Material	API5LX60
EA = rigidez axial (kN)	3,069391E+06
EJ = rig. flex. (kNm ²)	25,035E+03

Obs.: g = aceleração da gravidade = 9,807 m/s²

Tabela 4.2 Propriedades do Material

ν = coef. de Poisson	0,30
E = mod. de Elast. (N/m ²)	2,100e+11
σ_p = lim. de prop. (N/m ²)	3,0678e+08
σ_y = lim. de esc. (N/m ²)	4,1383e+08
ϵ_y = def. no escoamento	2e-03
σ_r = tensão de rup. (N/m ²)	5,0134e+08
N = ciclos na vida útil	2e+06(14,5ksi/ $\Delta\sigma$) ^{4,38}
$\Delta\sigma$ = “stress range”	$\sigma_{\max} - \sigma_{\min}$

Condições de Processamento e de Contorno

Tabela 4.3 Condições Gerais

H = lâmina d’água (m)	1000
Condições de Contorno	bi-articulado
Ps = peso submerso (kN)	535,57

Tabela 4.4 Casos de Processamento

Caso	Perfil de Correnteza (*)	Tração no Topo (T/Ps)
1	constante	1,0
2	linear	1,0
3	constante	1,2
4	linear	1,2
5	constante	1,5
6	linear	1,5

Dado o conjunto de casos descritos acima, efetuaram-se as análises e comparações, assumindo-se, para tanto, um Número de Strouhal igual a 0,23 e uma Faixa de “lock-in” dada por uma Velocidade Reduzida compreendida no intervalo $4 \leq V_r \leq 6,5$ para os casos com perfil de correnteza constante e no intervalo $4 \leq V_r \leq 6$ para os casos com perfil de correnteza linearmente variável

(*) Perfis de Correnteza:

- constante: velocidade constante de 1,00 m/s;
- linear: velocidade linearmente decrescente com a profundidade e com velocidade no topo de 1,00 m/s.

com a profundidade. Desta forma, foram obtidos os seguintes resultados:

4.1 Caso 3: Velocidade Constante de 1m/s bem como Razão entre Tração no Topo e o Peso Suspenso igual a 1,2

Como comparação entre os RMS de Tensão obtidos pela Rotina “viv.m” apresentada e os respectivamente obtidos com o “Shear7”, tem-se a figura 4.1 adiante.

Estes resultados referem-se a um único modo natural, modo este de **Maior Dano**, correspondente ao 35° modo no caso do aplicativo da EPUSP e ao 30° modo no caso do aplicativo “Shear7”.

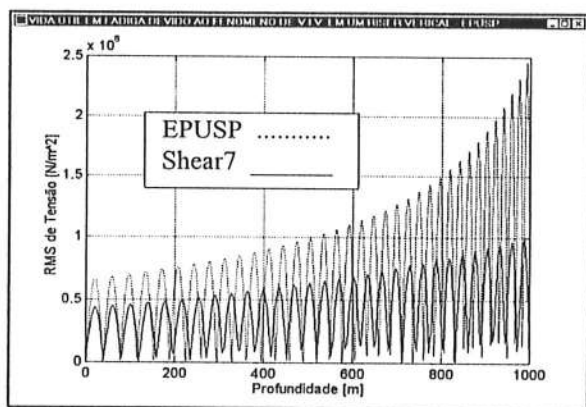


Figura 4.1 Comparação do RMS de Tensão para o Caso 3

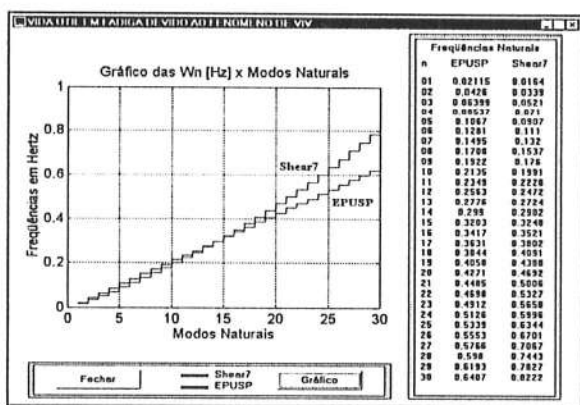


Figura 4.2 Comparação entre Frequências Naturais dos Caso 3 e 4

Neste caso 3 de análise, percebe-se uma discrepância quando na comparação

dos RMS de Tensão resultantes do processamento de ambos os aplicativos, a qual posteriormente será melhor discutida, mas que por ora pode ser atribuída às diferenças nos valores das frequências naturais superiores ao 18° modo de vibrar, como pode ser verificado na figura 4.2.

4.2 Caso 4: Velocidade Linearmente Variável partindo com 1 m/s no Topo, bem como Razão entre Tração no Topo e o Peso Suspenso igual a 1,2

A comparação do RMS de Tensão obtido em ambos os aplicativos permite, para o Caso 4 a obtenção da figura 4.3 apresentada a seguir.

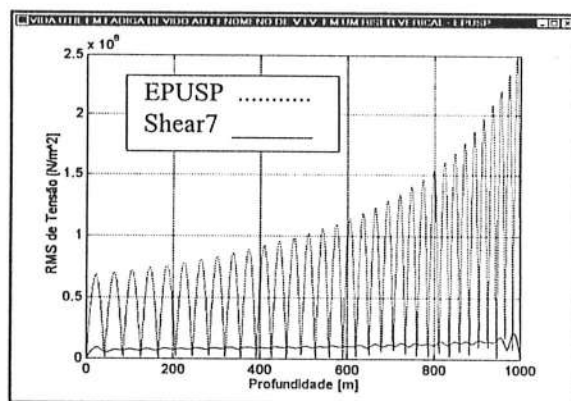


Figura 4.3 Comparação do RMS de Tensão para o Caso 4

É importante destacar que na análise via aplicativo da EPUSP houve a excitação do 2° ao 31° modo natural, excetuando-se contudo o 5° modo. Já no caso da análise via “Shear7” foram excitados os modos naturais compreendidos no intervalo que vai do 18° ao 30° modo natural. O RMS de Tensão obtido com o aplicativo da EPUSP refere-se ao 31° modo natural e o do “Shear7” diz respeito a uma composição dos modos excitados segundo a sua análise.

As Frequências Naturais neste Caso 4 são as mesmas do Caso 3, haja vista a não influência do Perfil de Velocidades no cálculo das mesmas. Vale portanto, para

este quarto caso de análise, a mesma figura 4.2 de comparação entre frequências obtidas em ambos os aplicativos.

4.3 Caso 5: Velocidade Constante de 1m/s bem como Razão entre Tração no Topo e o Peso Suspenso igual a 1,5

Analogamente ao Caso 3, pode-se agora efetuar o mesmo tipo de comparação tomando-se contudo, neste Caso 5, uma Razão entre a Tração no Topo e o Peso suspenso igual a 1,5. Obtem-se então a figura 4.4.

Destaca-se ainda o fato de que na comparação estabelecida com a figura 4.4, os resultados plotados referem-se ao 28º modo natural na aplicação da Rotina da EPUSP e ao 29º modo natural na aplicação do “Shear7”.

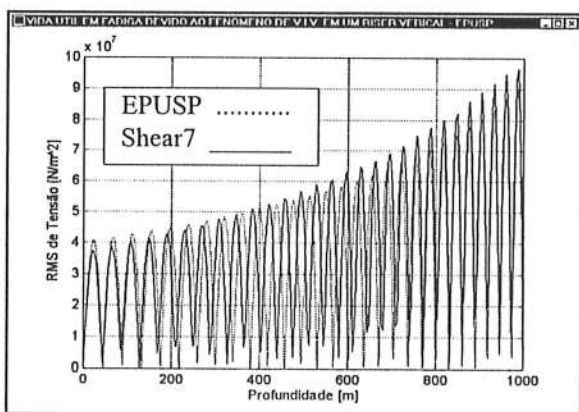


Figura 4.4 Comparação do RMS de Tensão para o Caso 5

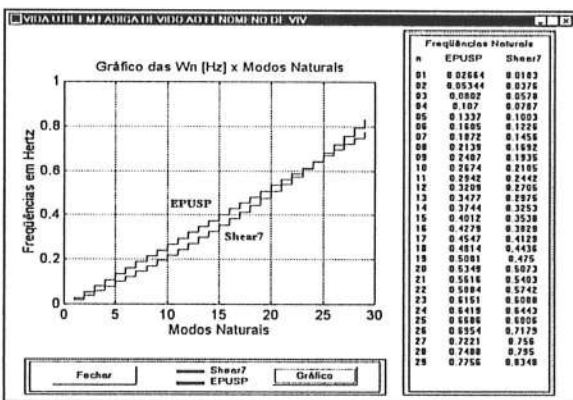


Figura 4.5 Comparação entre Frequências Naturais dos Caso 5 e 6

A figura 4.5 diz respeito à comparação entre as Frequências Naturais obtidas em ambos os aplicativos, apresentada tal qual nos Casos 3 e 4, sendo agora no entanto assumida uma Razão entre a Tração no Topo e o Peso Suspenso de 1,5.

É importante verificar neste caso 5 que a melhor proximidade entre os valores de frequências naturais na região da respectiva faixa de “lock-in” ($f_{22} \leq f_n \leq f_{28}$) e portanto a região de maior interesse pela implicação de maiores danos à estrutura (ver figura 4.5), garantiu a equivalência entre os resultados de RMS de Tensão observada na figura 4.4.

4.4 Caso 6: Velocidade Linearmente Variável partindo com 1m/s no Topo, bem como Razão entre Tração no Topo e o Peso Suspenso igual a 1,5

De maneira análoga aquela adotada nos casos anteriores, obtem-se a seguinte figura 4.6, comparativa do Caso 6.

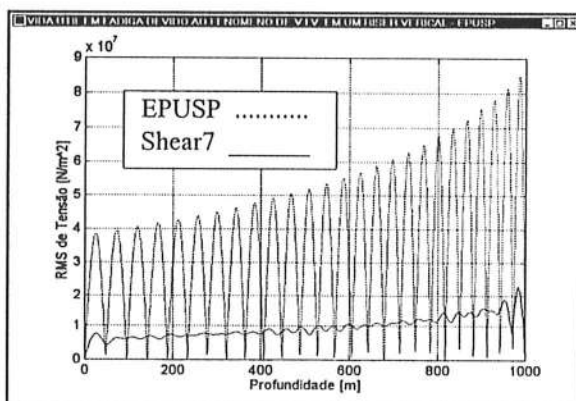


Figura 4.6 Comparação do RMS de Tensão para o Caso 6

Quando na análise via rotina da EPUSP verificou-se a excitabilidade dos modos naturais compreendidos entre o 2º e o 31º modos, excetuando-se aí o 4º modo. No caso da análise via “Shear7”, verificou-se que todos os modos naturais compreendidos entre o 17º e o 29º modos

naturais foram excitados. A comparação do RMS de Tensão se faz segundo o 26º modo natural (modo de maior Dano) no caso da rotina "*viv.m*", bem como a uma composição dos modos excitados no caso do "Shear7".

4.5 Discussão dos Resultados

Como forma de síntese é interessante transcrever em uma tabela os vários modos excitados em cada caso analisado. A tabela 4.1, apresentada mais adiante, servirá, portanto, como ponto de partida para a discussão dos resultados já apresentados.

Casos	EPUSP Modos Excitados	Shear7 Modos Excitados
3	35º	30º
4	(do 2º ao 31º exceto o 5º)(*)	do 18º ao 30º
5	28º	29º
6	(do 2º ao 31º exceto o 4º)(**)	do 17º ao 29º

Tabela 4.1 Modos Utilizados nos Gráficos de RMS de Tensão

As discrepâncias observadas nas figuras 4.3 e 4.6 devem-se a fatores cujas origens, ao menos em um primeiro momento, são de difícil inferência, principalmente porque, como já foi mencionado, a rotina da EPUSP considera apenas o *Modo de Maior Dano*, procedimento este não adotado no "Shear7". Em geral, o que se pode afirmar é que, agindo-se desta forma, adota-se um resultado, claramente, muito conservador.

Por outro lado, nos casos 3 e 5, onde verifica-se a excitabilidade de um único modo natural, torna-se possível a

identificação da fonte destas eventuais discrepâncias. É importante tal identificação porque, dada a natureza exponencial das leis que regem o fenômeno de fadiga, diferenças como as que são verificadas na figura 4.1 acabam por serem amplificadas e, portanto, eventualmente inviabilizando determinadas configurações de análise comparativa.

Conforme adiantado, as discrepâncias observadas na figura 4.1 devem-se a um fator que se encontra em um nível anterior ao de aplicação dos modelos de VIV, qual seja a solução dos respectivos problemas de auto-valor. Nas situações de baixa pré-tensão, como no Caso 3 por exemplo, o efeito da rigidez flexional em modos elevados, que apresentam semi-comprimento de onda relativamente pequeno, da ordem do comprimento de flexão, é presente e responde pelas diferenças observadas nas frequências naturais a partir do 18º modo, já que na análise via "Shear7" tal efeito é considerado, o mesmo não acontecendo, por simplificação, na solução analítica aqui utilizada e apresentada pela EPUSP. Obviamente, quando da implementação de um código computacional definitivo, o problema de auto-valor deve ser tratado de forma integral, suprimindo tais discrepâncias.

Todavia, nas situações como aquelas verificadas no Caso 5, onde a pré-tensão no "*riser*" é de maior expressão e, portanto, onde o efeito de rigidez flexional passa a ser importante apenas em frequências acima da faixa de "*lock-in*", neste caso acima do 28º modo natural, pode-se afirmar, com segurança, que os modelos de previsão da Vibração Induzida pela Vorticidade implementados nas rotinas de análise e processamento da EPUSP e do "Shear7" são *equivalentes, quando em perfil de velocidade constante*.

(*) apenas o 31º, modo de maior dano, foi considerado na determinação do RMS de Tensão da figura 4.3.

(**) apenas o 26º, modo de maior dano, foi considerado na determinação do RMS de Tensão da figura 4.6.

5. Conclusões

A presente atividade objetivou verificar a consistência do Modelo de Iwan-Blevins/Lyons-Patel, quando na predição da Vida Útil em Fadiga devido ao Fenômeno de VIV.

À luz dos resultados obtidos, devidamente comparados com os respectivamente obtidos com o "*softwear - Shear7*" e aqui apresentados, pode-se concluir que, mesmo com toda a complexidade dos modelos adotados na descrição do fenômeno, *percebe-se boa equivalência entre os mesmos, quando em perfil de velocidade constante*. Quando em perfil de velocidade variável, o critério utilizado pela EPUSP, tomando o modo correspondente ao maior dano, mostra-se, claramente, muito conservador, se comparado ao critério de composição modal utilizado pelo "Shear7".

Dada a complexidade em se descrever o Fenômeno de VIV e a grande quantidade de parâmetros envolvidos, torna-se imprescindível, qualquer que seja o modelo de predição, uma gama considerável de afeição ao assunto, para que desta forma não se tomem parâmetros equivocados que acabem por comprometer os resultados desejados. Desta forma, como o modelo de Dano Acumulado é exponencial, pequenos desvios na predição das tensões envolvidas podem ser drasticamente amplificados, tornando imprescindível uma análise criteriosa e cuidadosa, que não peque por considerações de pouca fundamentação.

Finalmente destaca-se a aplicabilidade do modelo aqui apresentado mesmo em casos mais complexos de configuração estrutural, como por exemplo em "*catenária*". O Modelo de Iwan-Blevins/Lyons-Patel está sendo incorporado, de forma adequada^(*), ao "*softwear - SteelCat*" de projeto, ora em desenvolvimento na EPUSP. Nesta

implementação, o problema de auto-valor é resolvido de forma completa, considerando-se o efeito da rigidez flexional, particularmente importante para a determinação das frequências naturais correspondentes a modos de número elevado em situações de baixo pré-tensionamento.

6. Bibliografia

- [1] Iwan, W.D. & Blevins, R.D. (1974) "*A Model for Vortex Induced Oscillation of Structures*". Journal of Applied Mechanics, September 1974, p.581-586.
- [2] Iwan, W.D. (1981) "*The Vortex Induced Oscillation of Non-Uniform Structural System*". Journal of Sound and Vibration, 1981, p.291-301.
- [3] Lyons, G.J. & Patel, M.H. (1986) "*A Prediction Technique for Vortex Induced Transverse Response of Marine Risers and Tethers*". Journal of Sound and Vibration, 1986,111(3), p.467-487.
- [4] Parra, P. & Aranha, J.A.P. - "*Vibrações Induzidas por Emissão de Vórtices: Modelo Fenomenológico e Experimentos*", relatório de Outubro de 1996, EPUSP, (46p).
- [5] Blevins, Robert D. - "*Flow-Induced Vibration*". New York, 1977, Van Nostrand Reinhold. (363p).
- [6] Martins, Clóvis Arruda - "*Amortecimento Ativo para Reduzir Vibrações Induzidas por Vórtices em Risers*". São Paulo, 1989. Tese apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para a obtenção do Título de Doutor.
- [7] Martins, Clóvis Arruda - "*Cabos e Tubos Submersos em Configuração de Catenária: Elementos de Análise e*

(*) O problema de auto-valor é resolvido de forma exata, via Método de Elementos Finitos

Dimensionamento", capítulo 4: Vibrações Induzidas por Vórtices. Relatório de Agosto de 1994.

[8] Chung, Tae-Young - "*Vortex-Induced Vibration of Flexible Cylinders in Sheared Flows*" . Cambridge, 1987. Dissertação apresentada ao Departamento de Engenharia Oceânica do MIT.

[9] Pesce, C.P. - Notas da disciplina de: "*Complementos de Matemática para Engenharia Mecânica I*", ministrada na Escola Politécnica da USP, 1992.

Agradecimentos:

Agradecemos à PETROBRÁS pelo apoio recebido no desenvolvimento do presente trabalho.

Agradecemos também o suporte parcial oferecido pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) através do processo 95/6888-3, bem como pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

Análise do desempenho do Transporte Offshore de Suprimentos

**Haroldo José Siqueira da Igreja,
Petrobrás, E&P, Brasil**

Resumo

O presente trabalho apresenta um método para acompanhamento do desempenho das embarcações utilizadas nos processos produtivos do sistema de transporte de suprimentos "offshore". Utiliza-se itens de controle e cartas de controle para avaliar e atuar sobre os processos críticos do sistema de transporte "offshore".

Abstract

This paper shows a control method to monitor offshore supply vessels performance of offshore transport system. It is utilized control items and control charts to analyse critical processes of offshore supply system.

1 - Apresentação do problema

A repetição das tarefas nos processos de transporte de suprimentos "offshore" propicia a obtenção de dados de tempos dispendidos e quantidades manuseadas, que permitem as medições do desempenho existentes para cada tipo de embarcação. Estes dados indicarão os processos com maiores variações e com maiores desperdícios de tempos. Indicarão também quais os melhores e piores performances de embarcações e processos como um todo.

Para cada processo crítico acompanhado, é necessário definir o que precisa ser controlado, os fatores externos e internos que geram variações no resultado de cada processo, estudar as variações dos fatores e identificar as causas das variações do fator responsável pelas

Rui Carlos Botter, Departamento de Engenharia Naval e Oceânica, EPUSP, Brasil,

E-Mail: rebotter@spider.usp.br

**IPIN XV COPINAVAL Meeting
Montevideo - Uruguay
11 - 14 Nov. 1997**



variações significativas do processo analisado.

Como exemplo, é necessário acompanhar os estados de mar, para avaliar os tempos de navegação, de manobras de aproximação, os casos onde não houveram atracações por condições de mar adversas, os tempos aguardando sonda e aguardando guindaste, para que o sistema de transporte de suprimentos seja melhor monitorado.

Quando determinado processo não está controlado, ou seja, existem muitas variações nos seus resultados, torna-se complicado planejá-lo de maneira eficiente para obter determinado resultado. No caso do sistema de transporte de suprimentos "offshore", que possui vários processos, um dependente do outro ou um é interligado ao outro, onde as variações nos resultados de seus processos irão influir no resultado final do sistema. Desta forma, o produto final, ou seja, a carga transportada dentro de determinadas condições de custo e prazo ficará afetada pelo desempenho de cada processo ou componente do sistema.

No presente trabalho busca-se controlar cada um dos processos críticos de modo que os seus resultados sejam previsíveis. Com os processos sob controle, se terá um elevado nível de confiança de que os resultados dos processos serão próximos dos resultados planejados.

A Tabela 1 mostra alguns processos críticos do sistema que precisam ser controlados, os itens de controle possíveis de cada processo e os fatores que precisam ser acompanhados.

Os fatores variam afetando um ou mais processos. Quando ocorrem variações significativas no processo precisa-se

00001

identificar o fator responsável e a causa da variação.

Apenas com o acompanhamento estatístico dos processos e os fatores que os afetam, pode-se monitorar a performance de um sistema de transporte "offshore" com rapidez e eficiência. A carta de controle é um método eficaz de acompanhamento de processos à nível operacional e gerencial.

2 - O embasamento científico

Os estatísticos mostram que muitas distribuições de probabilidade observadas nos sistemas em geral, possuem um formato que pode ser representado pela distribuição normal ou Gaussiana (Monk,1991).

Esses estudos consideram que para uma curva de distribuição normal, a probabilidade de um valor fora dos limites dos 3s (três vezes o desvio padrão da amostra), para cada lado da média, ocorrer de modo ocasional não é significativa. Significa dizer que ao repetir-se os testes, o evento deverá mostrar um valor semelhante ao anterior. Portanto, utilizam por convenção, os limites $UCL = \bar{X} + 3s$ e $DCL = \bar{X} - 3s$, onde UCL é chamado **limite de controle superior** e DCL é o **limite de controle inferior**. Fora destes limites resta a probabilidade de 0.05, ou seja, 0.02275 de probabilidade para cada extremo depois dos limites UCL e DCL na distribuição normal. (Monk,1991).

A distribuição estatística das variações de uma característica medida em um processo possui muitas causas. O princípio de Pareto define que poucas destas causas são responsáveis pelos maiores efeitos na variação total (Juran,1988).

A Figura 1 ilustra no Diagrama de Pareto, a relativa magnitude do efeito (Y) de cada uma das causas (x) da variação de um processo. Mas, cada causa varia a sua magnitude como mostra as distribuições estatísticas, ou seja a causa x_1 está fazendo a característica Y mover-se em uma

direção, enquanto as outras, x_2 e x_3 estão movendo Y na direção oposta, com magnitude diferentes a cada momento. A dispersão de cada uma destas distribuições é medida pelo seu desvio padrão (σ) e a variação total da característica é dada por $\nabla x = \sqrt{x_1^2 + x_2^2 + x_3^2}$. Se $x_1 = 5$ e $x_3 = 1$, então $x_1^2 = 25$ enquanto que $x^2 = 1$. O efeito total de x_1 na variação é 25 vezes o efeito de x_3 , mesmo sendo x_1 somente 5 vezes maior do que x_3 . A causa x_1 é chamada Causa Fundamental ("red X") e a x_2 (a segunda maior causa) é chamada "pink X" (Juran,1988).

Existem várias ferramentas gráficas utilizadas para apresentar dados de variáveis analisadas em processos que se pretende verificar e controlar as variações.

A carta de controle é uma dessas ferramentas com a vantagem de ter embasamento estatístico na análise e apresentação de dados, permitindo visualizar as medidas das dispersões (desvio padrão ou a amplitude) e a tendência central (média dos valores). A montagem de uma carta de controle segue os seguintes passos:

- Traçam-se duas cartas, uma para a medida de tendência central (a média) e outra para a medida de dispersão (desvio padrão s ou amplitude R). A Figura 2 mostra um exemplo de carta **Xbarra-R** (carta de amplitudes) para a "velocidade de ida" para as UM's de uma embarcação chamada Arraia. Cada ponto lançado na carta superior é a média de 5 medidas de velocidade. Cada ponto lançado na carta inferior é a amplitude (R) dessas 5 medidas.
- Os grupos de amostras são coletados segundo uma sequência que obedece intervalos constantes de tempo. Na Figura 2 foram coletadas cinco medições por mês, durante seis meses, de julho/96 a dezembro/96 na Baía de Campos;
- A carta deverá ter como eixo vertical a linha graduada com intervalos

00002

correspondentes à magnitude das amostras à lançar;

- Para cada grupo de amostras calcula-se a média e lança-se na carta das médias. Faz-se o mesmo para o desvio padrão ou para a amplitude e lança-se na carta de medidas de dispersão.

A utilização da carta de controle serve aos seguintes propósitos :

- Prover informações de determinada característica ou item de controle do processo em análise;
- Prover informações visando determinar a capacidade do processo em análise;
- Prover informações visando decisões concernentes à especificação do processo em questão;
- Prover informações para decisões contínuas sobre o processo em questão, de modo a se decidir quando um patamar normal de variações ocorre e pode ser deixado fluir sem ações corretivas e também quando um patamar de variações não é normal e deve-se procurar as causas assinaláveis.

A utilização da carta de controle permite :

- eliminar as anomalias devido as "**causas assinaláveis ou especiais**" (Besterfield, 1988), nas quais a atuação imediata é através de "ação corretiva";
- isolar os resultados indesejáveis devido as "**causas aleatórias**, comuns ou sistêmicas";
- avaliar a **dispersão**, de tal forma a reduzi-la à níveis economicamente viáveis, aumentando a confiabilidade e reduzindo custos.

Quanto maior a dispersão dos resultados de um processo medido em uma carta de controle, menor a confiabilidade do processo.

Existem normas para a coleta de amostras de um processo, visando **controlar** os erros amostrais. Duas delas são as MIL-STD-414 e MIL-STD -105D (DOD, 1997) que visam as inspeções por variáveis e atributos, respectivamente, de um produto qualquer, definindo o tamanho

das amostras e o plano de aceitação do resultado obtido.

3 - Seqüência do acompanhamento do processo

Após as explicações anteriores pode-se fazer um fluxograma da seqüência do acompanhamento do processo.

A Figura 3 mostra o fluxograma com as principais etapas do acompanhamento de um processo. A carta de controle mede os resultados do processo. Havendo resultado indesejável, analisa-se os fatores externos e internos para identificar qual deles apresenta variações significativas que perturbaram o processo. Busca-se as causas para as variações e identifica-se a causa fundamental. Elimina-se a causa fundamental e acompanha-se o processo para assegurar-se que o processo está sob controle. Cria-se procedimentos operacionais que assegurem a não repetição do resultado indesejável.

Quando ocorre uma variação significativa verifica-se qual dos fatores externos e internos apresentou variações que geraram a variação do processo, comparando-se os dados históricos com os dados coletados no período da variação significativa. Aplica-se um método para identificar e eliminar a causa da variação. Na Figura 3 é indicado o MASP, Método de Análise e Solução de Problemas (Campos, 1994).

4 - Exemplo de aplicação nas variações da "Velocidade de Ida"

A velocidade de ida da embarcação, corresponde ao processo de navegação entre a base marítima da Petrobras e as unidades de prospecção e produção de petróleo, que é executado, em geral, quando a embarcação está carregada com suprimentos para serem entregues.

Na carta de controle mostrada na Figura 4, o processo está fora de **especificação** por que :

00003

- Os pontos 7, 10, 16, 17, 18, 21, 24, 25, 27 e 29 estão com valores acima da linha do limite de especificação superior (USL), definido como 8 nós (linha tracejada horizontal superior);
- Os pontos 1, 2, 4, 5, 6 e 28 estão com valores abaixo da linha do limite de especificação inferior (DSL), definido como 7 nós (linha tracejada horizontal inferior);

4.1 - Identificando o problema que leva as variações anormais da “Velocidade de Ida”

Na Figura 4 verificamos também que o processo está fora de **controle** por que :

- Os pontos 2, 4, 5 e 6 estão abaixo ou sobre a linha do limite de controle inferior (DCL) (6.397);
- Os pontos 17 e 25 estão acima do limite UCL (8.93);

O problema do processo está identificado. No caso, é a variação acima do tolerável para a velocidade da embarcação Arraia

4.2 - Verificação das Causas Prováveis das variações anormais na “Velocidade de Ida”

O próximo passo consiste em identificar as causas da variação da velocidade. É necessário concentrar atenção nos pontos mais discrepantes, mostrados na Figura 4, ou seja :

- Naqueles pontos fora dos limites de controle (UCL/DCL);
- Nos pontos 1, 2, 3, 5 e 6 por que representam os pontos de menor velocidade da embarcação. O ponto 2 está mais afastado do limite DCL e deverá ser o primeiro ponto a ser estudado. O ponto 2 corresponde ao mês de agosto de 1996;
- Comparar as medições atuais dos fatores com as medições históricas dos mesmos fatores;

As informações sobre fatores externos e internos deverão ser levantadas, dando ênfase a :

- Checagem das alturas de ondas do período :

Os registros da Figura 5 mostram certa regularidade das alturas de ondas, com variação entre 1.78 e 1.27 metros, para o mesmo período dos pontos visados (1, 2, 3, 5 e 6) da Figura 4, ou seja, agosto de 1996. Os dados históricos da Figura 6 para altura de ondas são maiores que as medições atuais da Figura 5. Portanto, a causa não é altura de ondas.

- Checagem das velocidades de ventos no período :

Os registros de velocidades de ventos da Figura 7 (medições atuais) mostram certa regularidade das velocidades de ventos, com maior valor (UCL) de 26 nós enquanto que os registros de ventos da Figura 6 (dados históricos) mostram valor máximo de 30 nós em novembro/96, portanto, a causa não é velocidade de ventos.

- Checagem das condições de casco e calado de viagem :

Os calados registrados nas saídas de viagens, estão na tabela 1 e não denotam valores anormais.

A embarcação tem 6 anos de construída e os dados coletados para rugosidade também foram lançados na tabela 2.

Os registros da tabela 2 mostram certa regularidade para a rugosidade (135) com valores abaixo dos limites (350), mostrados na tabela 3. Portanto, a causa não é a rugosidade do casco.

- Checagem da potência dos motores propulsores.

Os registros de potência da tabela 2 estão com três valores (1301, 1250 e 1210) muito baixos em relação aos demais. A causa fundamental pode ser o motor da embarcação. Para se ter certeza, é necessária a coleta de dados dos motores propulsores, visando encontrar a causa da

perda de potência e fazer novas avaliações da velocidade da embarcação após a eliminação da Causa Fundamental.

5 - Conclusões e recomendações

Partindo do pressuposto que em termos de eficiência, o serviço de transporte pode ser tratado de forma semelhante aos processos produtivos, o presente trabalho, identifica características específicas dos processos de transporte de suprimentos "offshore", expõe os seus processos críticos e propõe um roteiro para aplicar a carta de controle, identificar anomalias e buscar suas causas.

Com a finalidade de demonstrar a aplicabilidade dos conceitos e métodos propostos foi realizado um estudo de caso para a navegação, mais especificamente com o processo "velocidade de ida" para as Unidades Marítimas, para as embarcações operando na Bacia de Campos/RJ.

Os resultados alcançados mostram a eficiência desse método de controle e como sua aplicação é fácil a nível operacional e gerencial da empresa.

Os dados necessários, as coletas e organização destes, para uma perfeita análise do processo do transporte offshore de suprimentos, ainda se mostram como a grande restrição. Recomenda-se que mais ênfase nessa questão, com o desenvolvimento de procedimentos sistemáticos de aquisição de dados sobre os fatores externos e internos que afetam os processos desse sistema de transporte.

As análises das anomalias dos processos darão ensejo à necessidade de classificação das anomalias, por processo pesquisado. Por esta razão, recomenda-se que se investigue as anomalias dos processos de transporte classificando-as.

6 - Referências Bibliográficas

Ballou, Ronald H.- Logística Empresarial. Ed. Atlas, 1995.

EF 04 XV COPINAVAR Meeting
Montevideo - Uruguay
11 - 14 Nov. 1997

Beck, Robert - Oil Industry Outlook. 1996-2000. Projection to 2004. 1996.

Besterfield, Dale H. - Quality Control. Ed. Prentice-Hall do Brasil Ltda. Rio de Janeiro.

Campos, Vicente Falconi - TQC - Gerenciamento da rotina do trabalho do dia-a-dia-UFGM, 1994.

EIA - Energy Information Administration of United State of America. Anual Energy Review 1993. Informações também contidas no endereço internet <http://www.eia.doe.gov/oiaf/ico95/tables/tb13.txt>.

DOD - U.S. Department of Defense, 1997. Informações também contidas na página 8 do texto existente no endereço internet <http://tecnet0.jcte.jcs.mil:9000/htdocs/teinfo/directives/soft/spec3.html>.

Juran, J.M. - Juran's Quality Control Handbook. Ed. MacGraw-Hill, 1988.

Juran, J.M. - Juran na Liderança pela Qualidade. Ed. MacGraw-Hill, 1988.

Kume, Hitoshi, Métodos Estatísticos Para Melhoria da Qualidade. Trad. de "Statistical Methods for Quality Improvement" publicado pela AOTS - The Association for Overseas Technical Scholarship. Japão, 1988.

Lascelles, D.M.; Dale, B.G. Examining the barriers to Supplier development. International Journal of Quality and Reliability Management, v.&n.2.p.46, 1990.

Monk, Andrew - Exploring Statistics with Minitab. Ed. John Wiley & Sons, New York, 1991.

Manning, George C. - Teoria e Técnica do projeto do navio. Centro de Publicações Técnicas da Aliança. Rio de Janeiro, 1964.

Revista Petrobrás. Publicação de maio/1996.

PETROBRÁS. Dados internos pertencentes ao CEMPES/DIPREX não divulgados. 1988.

Global Waves Statistics. US Department of Commerce. National Oceanic and

00005

Atmospheric **Administration.**
Environmental **Information**
Services,1997. Informações também

contidas endereço internet http:
//www.noaa.gov

.. 00006

Tabela 1. Exemplo de processos críticos e os fatores que os afetam

Processos Críticos	Item de controle	Fatores externos	Fatores Internos
Navegação para a UM	Velocidade de ida	Alturas de ondas Velocidade de ventos Velocidade de Correntes	Calado, Potência e rugosidade do casco
Manobra de aproximação da UM	Tempo de manobra	Idem	Idem
Bombeio de granéis	Vazão de bombeio Tempo de conexão	-----	Perda de carga na UM Perda de carga na embarcação
Içamento de cargas	Tempo de içamento	Altura de ondas Velocidade de ventos	-----
Fundeio da embarcação	Tempo de fundeio Tempo de içamento de âncora	Profundidade Alterações na programação	-----
Programação de cargas	Número de atendimentos a fazer	Distâncias entre UM's da programação da embarcação escolhida	-----

Tabela 2. Registros de controle da rugosidade, potência e calados

Item	rugosidade	data	IHP	data	Calado
1	112	01/10/95	1450	01/03/96	3.1
2	135	01/10/96	1301	01/04/96	3.2
3			1440	01/05/96	3.1
4			1445	01/06/96	3.2
5			1445	01/07/96	3.3
6			1250	01/08/96	3.4
7			1450	01/09/96	3.3
8			1445	01/10/96	3.2
9			1210	01/11/96	3.3
10			1445	01/12/96	3.2

00007

Tabela 3.- Medições de rugosidade de embarcações de diferentes anos de idade (Fonte : Petrobrás)

CONDIÇÃO	AHR (μm)
Embarcação nova durante sua construção, colocação da quilha e tinta primer	40-60
Embarcação nova com recobrimentos anti-corrosivo e anti-incrustante	80-180
Embarcação depois de três anos de serviço	melhor 110 pior 350
Embarcação depois de seis anos de serviço	melhor 130 pior 650
Embarcação depois de quatorze anos de serviço	melhor 380 pior 1100

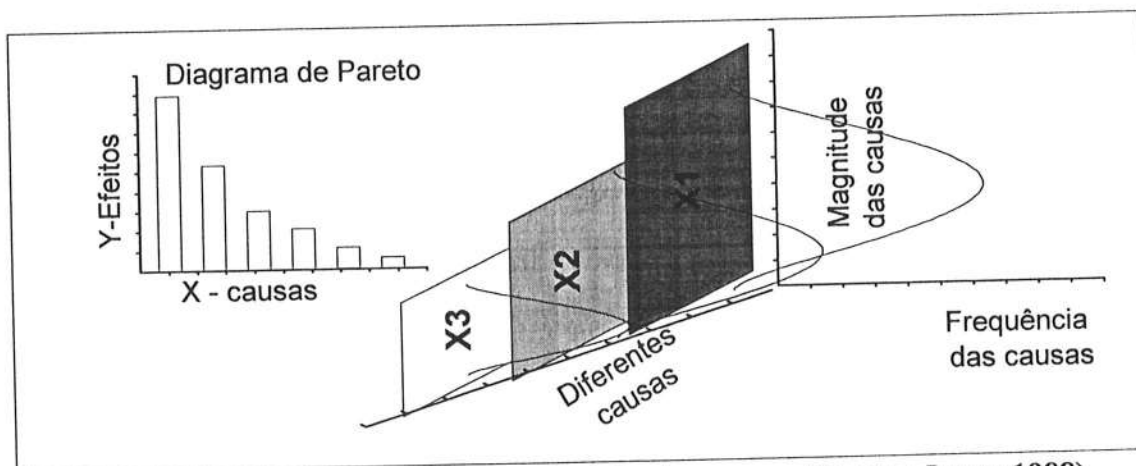


Figura 1. Diagrama de Pareto e a distribuição das causas (Fonte : Juran,1988)

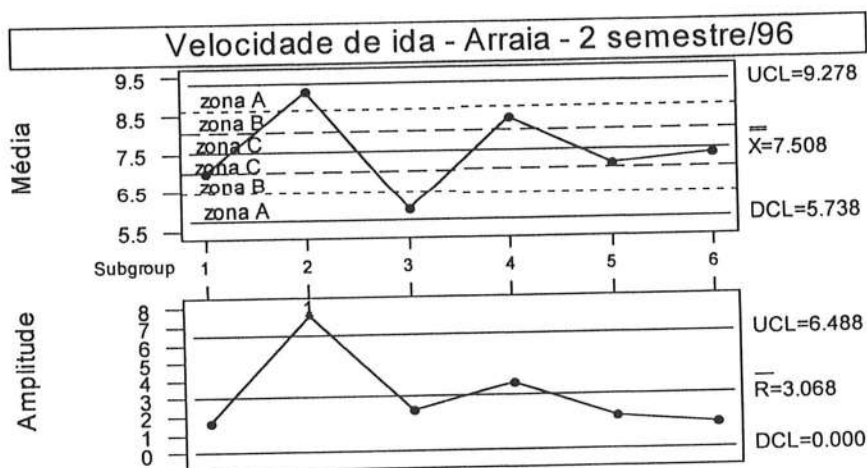


Figura 2. Carta de Controle Xbarra-R.

00008

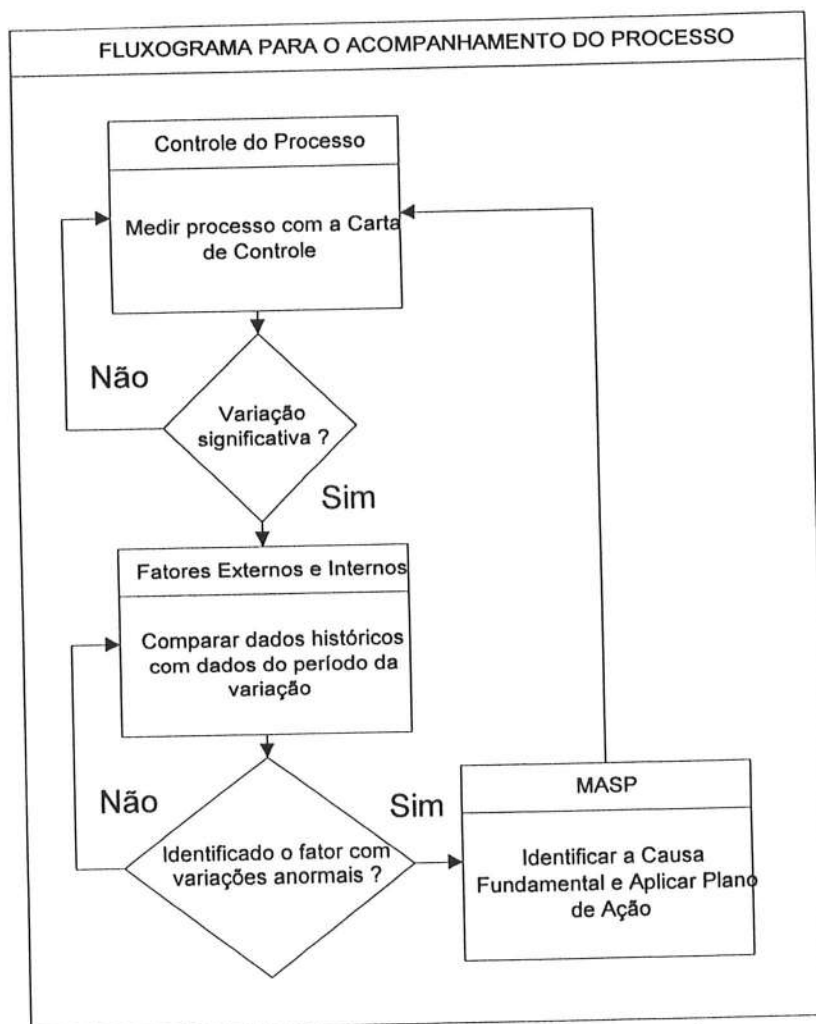


Figura 3. Fluxograma para o acompanhamento do processo

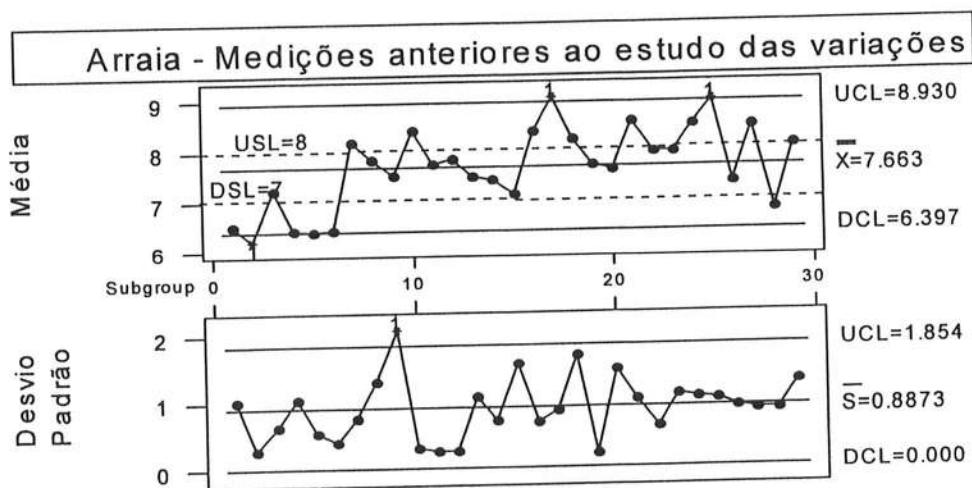


Figura 4. Medições da velocidade da embarcação
(Fonte : PETROBRÁS)

00009

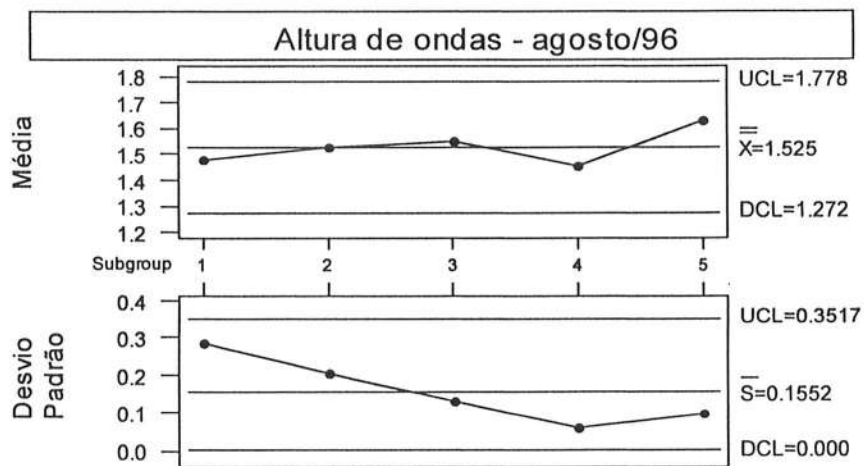


Figura 5. Registro das alturas de ondas

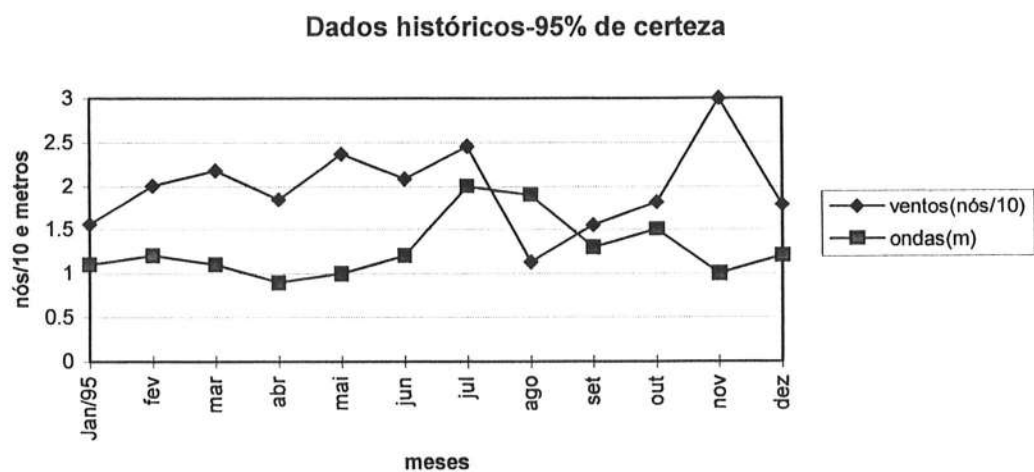


Figura 6. Velocidades de ventos e alturas de ondas do ano de 1995 (Fonte : PETROBRÁS)

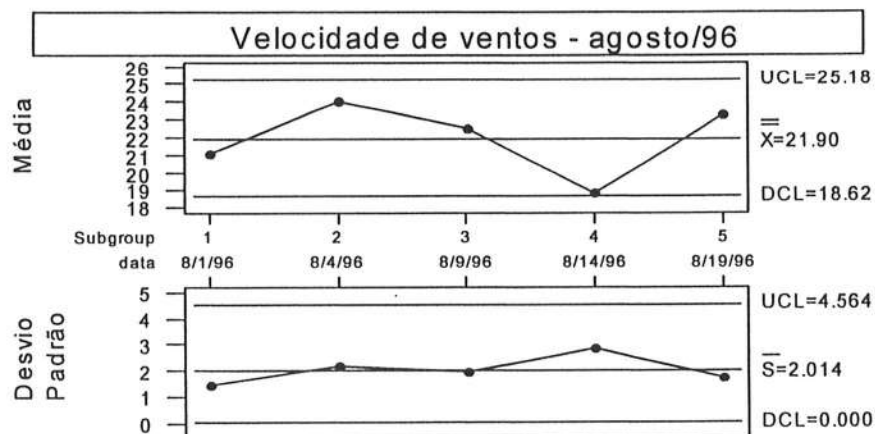


Figura 7. Registro de velocidades de ventos

00010

CÁLCULO DE CONCENTRAÇÃO DE TENSÕES EM JUNTAS TUBULARES UTILIZANDO REDES NEURAIS ARTIFICIAIS

Eng. MSc. Ademar de Azevedo Cardoso
Prof. Dr. Oscar Brito Augusto
Prof. Dr. Carlos Alberto Nunes Dias
Depto. de Eng. Naval e Oceânica da
Universidade de São Paulo



Resumo

Neste trabalho, como alternativa para o cálculo do Fator de Concentrações de Tensão em juntas tubulares, propõe-se uma nova abordagem onde se utilizam Redes Neurais Artificiais (RNA), cuja característica principal é a capacidade de generalização, a partir de um conjunto de dados, sem a necessidade de se estabelecer, *a priori*, uma função explícita entre as variáveis de entrada e as de saída do problema. Para o treinamento da rede foram utilizados modelos calculados através do Método dos Elementos Finitos onde se contabilizou a geometria tridimensional do cordão de solda da junta. O procedimento proposto, como um todo, representa um avanço em relação aos métodos tradicionais de cálculo de concentração de tensões em juntas, quer seja porque contabiliza os efeitos do modo pelo qual se faz o preenchimento pela solda, quer seja porque utiliza RNA e prescinde do conhecimento explícito de fórmulas matemáticas.

Abstract

As an alternative approach to calculate the Stress Concentration Factor we propose the Artificial Neural Networks (ANN). Neural networks have the ability to learn, to generalize and, besides, the user does not need to know *a priori* a function between input and output data. The training set used in this research work was obtained by FE simulations of the joint taking into account the 3D geometry of the welding fillet between chord and brace of the joint. The procedure proposed represents an advance among the traditional SCF calculations for tubular joints, both because it takes into account the effects of the welding fillet in the SCF and because it uses the Neural Network approach for the stress concentration factor computation.

1. INTRODUÇÃO

Da pesquisa na literatura existente sobre juntas tubulares soldadas, veja referências 1, 2 e 3, evidencia-se que as diversas formulações utilizadas para o cálculo do Fator de Concentração de Tensões (FCT) são, basicamente, obtidas por procedimento similar. Geralmente, combinam-se as variáveis julgadas relevantes para o cálculo do FCT, gerando-se inúmeras estruturas de conformação geométricas distintas que são ensaiadas mecanicamente em laboratório ou simuladas através de programas baseados no Método dos Elementos Finitos (MEF). De posse dos resultados, idealiza-se uma expressão que

represente o fenômeno e ajustam-se os parâmetros desta expressão com técnicas de regressão.

Muitas vezes, no entanto, a expressão idealizada para o cálculo do FCT fornece bons resultados apenas para uma faixa restrita de valores das variáveis envolvidas no modelo [4], ou porque o conjunto de dados é inadequado para a regressão, ou porque a expressão em seu todo não é a mais adequada. Em certos casos, como no da junta tipo Y, tubo principal e secundário têm expressões diferentes, ressaltando-se o que é, provavelmente, a principal dificuldade dos pesquisadores: encontrar uma

IPEN XV COPINA TAL Meeting
Montevideo - Uruguay
11 - 14 Nov. 1997

expressão matemática simples que represente adequadamente o fenômeno da concentração de tensões nas juntas soldadas. As formulações propostas por Kuang [1], Gibstein [2], UEG [3] e Smedley [4], por exemplo, são todas diferentes entre si e evidenciam o grau de incerteza presente em suas avaliações.

Neste trabalho propõe-se um procedimento alternativo para o cálculo do FCT, no qual duas investidas inovadoras são experimentadas no intuito de aprimorar os métodos anteriores.

Primeiro, considera-se um conjunto de dados obtidos de simulações pelo MEF, utilizando-se de elementos sólidos tridimensionais, o que possibilita a inclusão do cordão de solda na geometria do modelo. Com isso, os resultados obtidos tendem a ser mais acurados, seja pela melhor representação física do modelo, seja pela obtenção direta do FCT, sem a necessidade de extrapolações, como usualmente ocorrem nas análises através de modelos de casca.

Segundo, diferentemente do processo usual, o conjunto de dados obtido na etapa anterior não é utilizado para ajustar parâmetros em regressões e sim para treinar Redes Neurais Artificiais (RNA). Este enfoque é vantajoso na medida em que torna desnecessário o conhecimento *a priori* de uma expressão para o cálculo do FCT.

As RNA são baseadas nas redes neurais biológicas, com características de *aprendizado* e *generalização*. São estruturas formadas por muitos processadores simples, ditos *neurônios*, cada um deles com capacidade para pequenos cálculos. Os neurônios são conectados por *canais*, através de um valor numérico denominado *peso*. As RNA são *treinadas* através de um

processo que ajusta os pesos, utilizando-se do conjunto de treinamento, ou seja, *aprendem* de exemplos. Posteriormente, este conhecimento pode ser utilizado para previsão de novos casos, em um processo batizado de *generalização*.

No próximo item será apresentado uma descrição do funcionamento das RNA utilizadas neste trabalho. Em seguida, no item 3, uma descrição do modelo de elementos finitos utilizado para a simulação das juntas. No item 4 estão apresentados os resultados obtidos e, finalmente, no item 5, discorrem-se as principais conclusões e recomendações frutos do desenvolvimento deste trabalho.

———— Nomenclatura ————

D, d	= diâmetros dos tubos primário e secundário
FCT	= fator de concentração de tensões
G	= <i>gap</i> , folga na raiz da solda entre o primário e o secundário
MEF	= Método dos Elementos Finitos
r	= raio de concordância
RNA	= Redes Neurais Artificiais
T, t	= espessura dos tubos primário, secundário
X_i	= vetor com valores das variáveis de entrada
$\bar{Y}_i$	= vetor com valores das variáveis de saída calculados pela rede.
Y_i	= vetor com valores das variáveis de saída obtidos pelo MEF.
W_{ij}	= pesos entre os neurônios i e j .
η	= taxa de aprendizado da rede.
δ_j	= erro calculado no j -ésimo neurônio.
θ_j	= limiar de disparo do j -ésimo neurônio.
ζ_j	= soma ponderada dos sinais que chegam ao j -ésimo neurônio.
α	= ângulo de chanfro na base do membro secundário
β	= d/D .
γ	= $D/2T$
τ	= t/T .
θ	= ângulo entre os tubos.
ψ	= ângulo de inclinação do secundário ou ângulo de <i>heel</i>

2. REDES NEURAIS ARTIFICIAIS

Redes neurais artificiais são estruturas simples que podem armazenar conhecimento e torná-lo útil para posterior uso. Normalmente possuem alto grau de paralelismo, uma vez que os cálculos envolvidos em cada neurônio de uma camada são independentes dos outros neurônios daquela camada. Apresentam comportamento semelhante ao do cérebro humano em, pelo menos, três aspectos:

- o conhecimento é adquirido pela rede através de um processo de aprendizagem;
- as conexões entre os neurônios são usadas para armazenar o conhecimento.
- esse conhecimento pode ser utilizado para generalizações.

Lippmann [5] detalhou os tipos de RNA mais comuns, apresentando um estudo detalhado daquelas mais utilizadas, como por exemplo a máquina de Boltzmann, as redes de Hopfield, a rede de Kohonen e as redes do tipo *feed-forward*, com várias camadas interligadas entre si através de pesos.

As redes do tipo *feed-forward* envolvem aproximadamente 90% do total de aplicações de redes neurais utilizadas atualmente, conforme relata Haykin [6]. São particularmente indicadas para problemas em que o conjunto de dados conhecido é formado por casos relacionando entrada e saída, e por isso foram escolhidas para abordar o problema do cálculo do FCT.

2.1 - A Arquitetura

Na figura 1 estão representados os principais componentes de uma rede do tipo *feed-forward*. A primeira camada de

neurônios, chamada de camada inicial, possui tantos nós quantas forem as variáveis de entrada do problema. Na última camada são colocados tantos nós quantos forem as variáveis de saída. Assim, para resolver uma equação na variável z , que é função das variáveis x e y , por exemplo, seriam necessários dois neurônios na camada de entrada e um neurônio na camada de saída.

As camadas intermediárias, também chamadas de camadas ocultas, infelizmente, não obedecem a nenhuma regra geral.

Definir as camadas intermediárias, e também o número de neurônios em cada uma delas, é uma tarefa que depende de vários fatores, como o tamanho do conjunto de treinamento, o fenômeno a ser representado, o número de variáveis nas camadas de entrada e de saída.

As camadas são totalmente interconectadas, ou seja, todos os neurônios da primeira camada são conectados com todos os neurônios da camada seguinte, que por sua vez estão conectados com os neurônios da próxima camada, repetindo-se o processo até que se atinja a camada final. Essas conexões são realizadas por pesos aleatoriamente inicializados.

2.2 - O Treinamento

O tipo de treinamento da rede está diretamente associado aos dados disponíveis sobre o fenômeno que se deseja modelar. Voltando-se ao exemplo da função $z(x,y)$, imagine que exista um conjunto de dados composto por valores de x e y , associados a valores de z , o que, na nomenclatura de redes neurais, é chamado de pares de treinamento $((x,y),z)$. O treinamento com este conjunto é chamado de *supervisionado* porque,

~0000.3

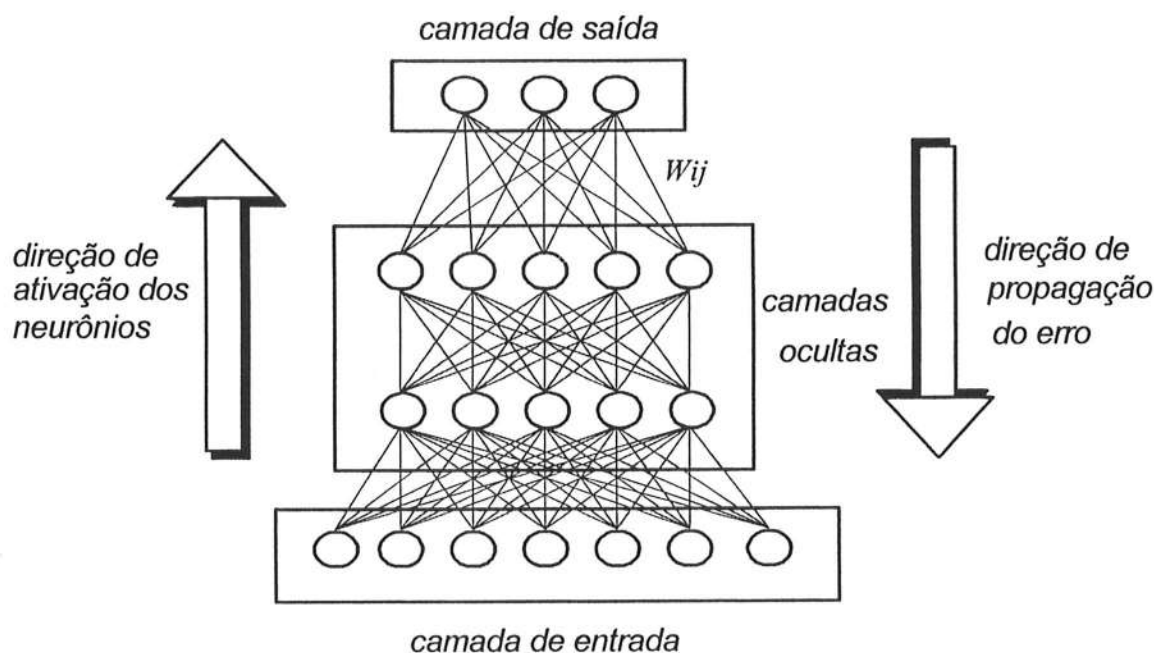


Figura 1- Rede Neural do tipo *feed-forward*

durante o treinamento, cada $\bar{z}$ fornecido pela rede pode ser comparado com o $z(x,y)$ da tabela. Por outro lado, se a tabela e dados contivesse apenas os pares (x,y) , o treinamento seria do tipo *não supervisionado*, o qual se caracteriza pela inexistência de um valor para comparação com o resultado fornecido pela rede. Este tipo de treinamento é comum em problemas de classificação, nos quais o objetivo é agrupar os dados segundo algum critério.

Para entender o treinamento das redes neurais do tipo *feed-forward*, considere-se, sem nenhuma perda de generalização, uma rede com uma camada de entrada com p neurônios, uma camada oculta com k neurônios e uma camada de saída com q neurônios. Considere-se ainda um conjunto de dados que relacionam causa e efeito do fenômeno em análise formados por m pares de treinamento $((X_1, Y_1), (X_2, Y_2), \dots,$

$(X_m, Y_m))$, em que X_i e Y_i são vetores de dimensões p e q .

No treinamento, o vetor X_i é associado com os neurônios da camada de entrada. Cada neurônio da camada oculta recebe uma somatória dos produtos dos componentes de X_i pelos respectivos pesos que o conectam com os neurônios da camada inicial. Este produto é submetido a uma função, usualmente não linear, produzindo um *signal* de saída daquele neurônio. O mesmo ocorre para todos os k neurônios da camada oculta. Em seguida, repete-se o processo entre as camadas oculta e final. O vetor obtido na camada final, $\bar{Y}_i$, representa, para aquela iteração, a aproximação da rede para a entrada X_i .

A diferença entre $\bar{Y}_i$ e o valor correto, Y_i , é então utilizada para modificarem-se os valores dos pesos entre as camadas de sorte a minimizar o desvio $\bar{Y}_i - Y_i$. Assim, na apresentação, à rede, do

~00004

próximo par de treinamento, ela estará configurada com os novos pesos.

Todos os m pares de treinamento são submetidos ao mesmo processo, sendo que, depois de cada um, os pesos são modificados até que a tolerância desejada seja atingida.

O algoritmo utilizado para fazer a modificação dos pesos é chamado de retro-propagação, nome oriundo do fato de se calcular o desvio na saída e “propagar” este desvio para trás até a primeira camada. Os principais passos do algoritmo podem ser resumidos, conforme representado na tabela 1. Maiores detalhes deste algoritmo podem ser encontrados em Freeman[7] e Wasserman[8].

Tabela 1 - Algoritmo de Retro-Propagação

1. Os pesos e os limiares são inicializados com valores aleatórios.
2. Apresenta-se o conjunto de treinamento, estabelecendo-se um conjunto de vetores na camada de entrada ($X_1, X_2, \dots, X_m$) e o respectivo conjunto ($Y_1, Y_2, \dots, Y_m$) na camada de saída.
3. Em cada nó, calcula-se a saída atual pela soma ponderada dos valores dos nós que chegam da camada anterior, fazendo-se uso da seguinte função:

$$y_j = \frac{1}{1 + e^{-(\zeta_j - \theta_j)}}$$

sendo:

ζ_j - a soma ponderada dos nós que chegam no j -ésimo nó;

y_j - a saída do j -ésimo nó;

θ_j - o limiar do j -ésimo nó.

4. O erro é atualizado, a partir dos pesos entre a camada de saída e a próxima, utilizando-se a expressão

$$W_{ij}(t+1) = W_{ij}(t) + \eta \cdot \delta_j \cdot y_j$$

sendo:

W_{ij} - peso entre o i -ésimo nó e o j -ésimo nó;

Se j é um nó de uma camada de saída, então:

$$\delta_j = \bar{Y}_j \cdot (1 - \bar{Y}_j) \cdot (\bar{Y}_j - Y_j)$$

Se j é um nó de uma camada interna então o valor de δ_j é calculado por

$$\delta_j = y_j \cdot (1 - y_j) \cdot \sum_k (\delta_k \cdot W_{kj})$$

η - a constante de aprendizagem da rede.

5. Volta-se ao passo 2 até atingir-se a tolerância desejada.

2.3 A generalização

Depois de treinada, ou seja, todos os pesos foram definidos de forma que, por algum critério, a tolerância requerida foi alcançada, a rede está pronta para fornecer resultados para casos que não foram utilizados durante o treinamento. Este processo, denominado de generalização, é o motivo pelo qual a rede foi treinada. O treinamento pode ser um processo extremamente demorado porém, uma vez treinada a rede estará apta a responder, quase que instantaneamente, à qualquer solicitação de entrada.

2.4 Principais dificuldades

O processo de treinamento é usualmente feito pelo algoritmo de *retro-*

propagação, eventualmente com algumas modificações que podem acelerar o processo de convergência. Ainda assim, a minimização do desvio através da modificação do conjunto de pesos muitas vezes não atinge a precisão desejada. Isto porque, dependente da robustez do método de busca do mínimo da função erro, pode-se atingir alguma região de mínimo local que esteja longe de outra que poderia resultar a precisão desejada. Além disso, durante a busca pode-se atingir um patamar da função erro e não se conseguir sair, em um número aceitável de iterações, para uma outra região no domínio de busca. Alguns algoritmos, como por exemplo o "Simulated Annealing" [9], [10] sugerem técnicas que conseguem superar estes problemas, mas, em geral, o custo para tanto também é grande.

O número de neurônios na camada oculta é outro fator que pode introduzir erros nos resultados fornecidos pela rede e também tornar proibitivo o tempo necessário para o treinamento de um conjunto de dados. Um número insuficiente pode não conseguir extrair as características básicas do fenômeno estudado, assim como um número muito acima do ideal pode fazer com que a rede "memorize" os pares de treinamento. Mas, qual deve ser o número ideal? Depende do problema! Para atingi-lo é necessário que várias configurações sejam testadas, com um conjunto de treinamento, um de validação e um de teste, todos independentes entre si. Assim, depois de treinar um número suficiente de configurações, utiliza-se o conjunto de validação para comparar a performance dessas redes, com relação a uma função de erro arbitrada. Por fim, o desempenho da rede escolhida é verificado quanto ao conjunto de teste.

Todo este processo, dependendo do tamanho do conjunto de treinamento, pode levar dias e até semanas, mesmo em máquinas de alta performance.

3. MODELO DE ELEMENTOS FINITOS

Os dados utilizados para treinamento das RNA foram obtidos, por simulações numéricas através do MEF, de diversos casos de juntas tubulares soldadas tipo-Y. Para obter as geometrias discretizadas das juntas, foi desenvolvido um programa pré-processador específico de geração de malhas [11] com elementos sólidos isoparamétricos de oito nós (BRICK-8, com modos incompatíveis e ordem de integração igual a dois), possibilitando, assim, a representação precisa da intrincada geometria tridimensional do cordão de solda, conforme se mostra na figura 3.1.

O conjunto de dados gerado resulta de 256 casos de análise, para os quais foram tomados valores específicos de variáveis adimensionais, conforme o padrão usualmente encontrado na literatura. Nesses termos, foram consideradas as seguintes relações geométricas adimensionais típicas:

$0.4 \leq d/D \leq 0.8$, relação de diâmetros entre membros principal e secundário,

$0.4 \leq t/T \leq 0.8$, relação de espessuras entre membros principal e secundário,

$40 \leq \Psi \leq 90$, ângulo entre os membros principal e secundário.

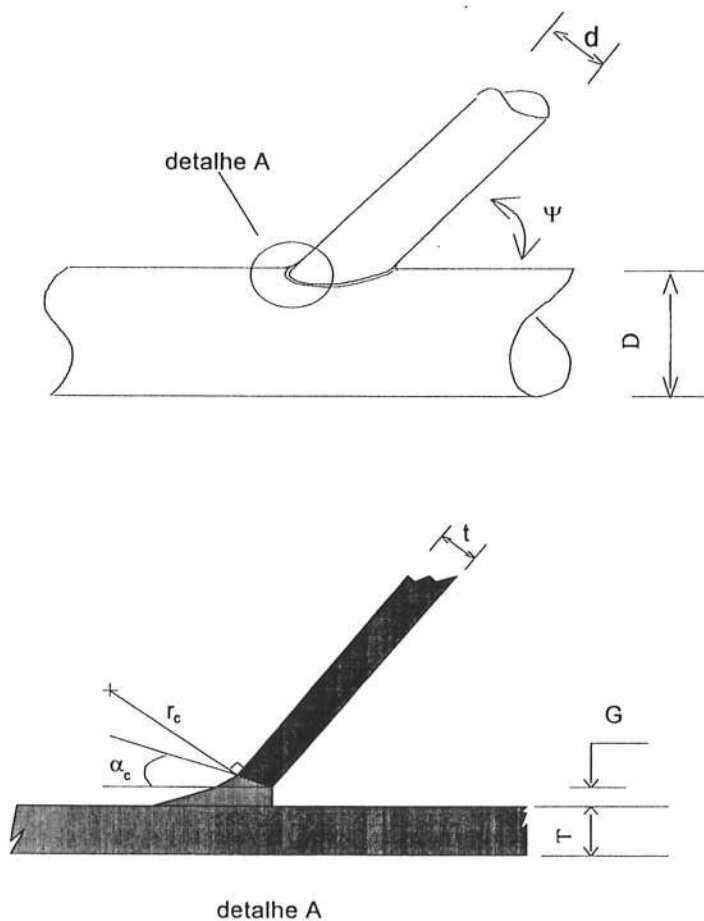
$10 \leq D/2T \leq 20$, relação entre diâmetro e espessura do membro principal

$0.1 \leq G/t \leq 0.8$, relação entre folga na raiz do cordão de solda e

00005

espessura do membro secundário,

$10 \leq \alpha \leq 45$, ângulo de chanfro na base do membro secundário.

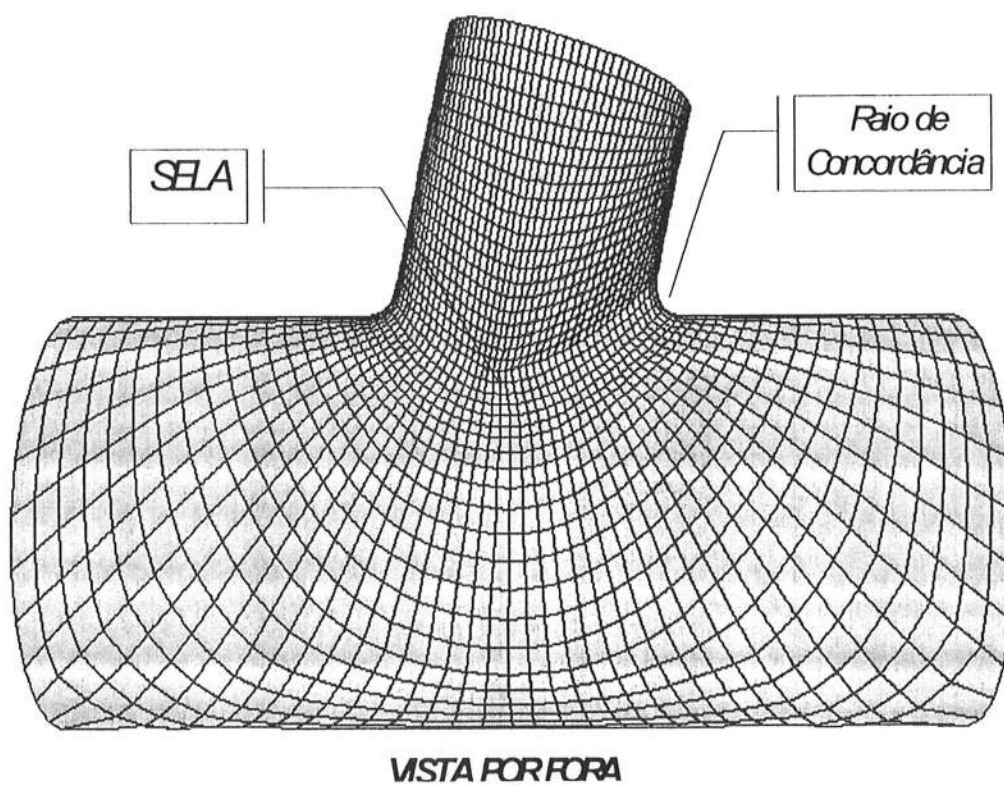
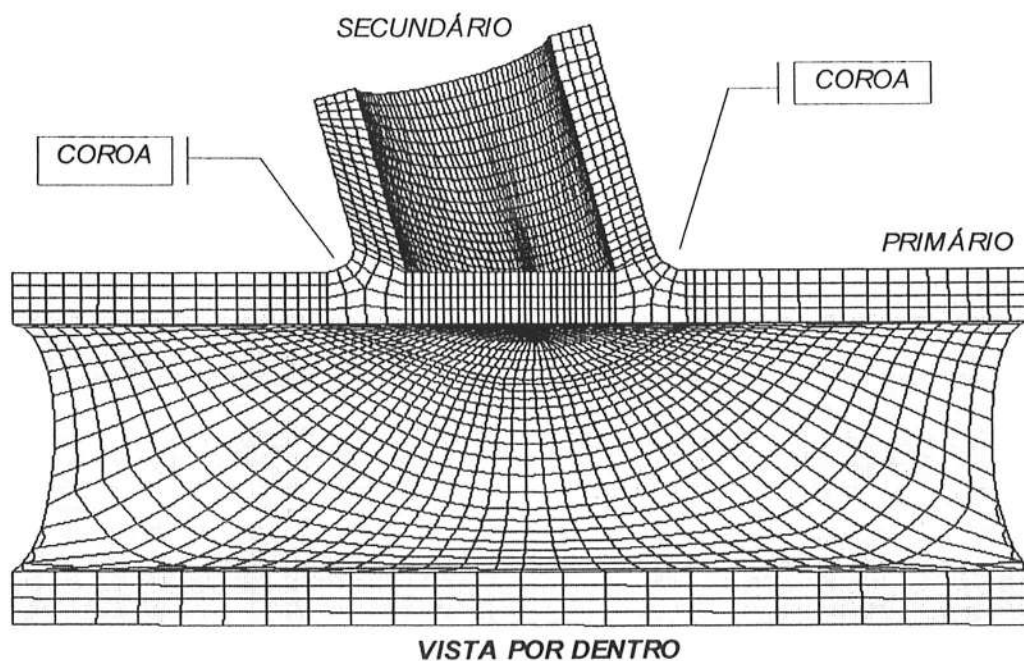


sendo:

- D diâmetro do tubo principal.
- d diâmetro do tubo secundário.
- Ψ ângulo de "heel".
- r_c raio de concordância.
- α_c ângulo de chanfro.
- G "GAP" entre os dois tubos.
- T espessura do tubo principal.
- t espessura do tubo secundário.

Figura 3.1 - Geometria da Junta tipo Y

200007



200008

Como solicitações sobre o membro secundário, foram tomados os casos típicos de força normal e de momento fletor no plano de simetria da junta. Nessa situação, as cargas nodais aplicadas na extremidade livre do secundário têm magnitude estabelecida de sorte a aí produzir máxima tensão de membrana com valor unitário, tal que a tensão de *Hot Spot* resulta igual ao Fator de Concentração de Tensões para ambos os casos de carga.

Todo o processo de cálculo e identificação das tensões máximas, por todos os 256 casos geométricos de juntas analisadas, foi automatizado em computador. Assim, após um total de aproximadamente 1000 horas de processamento (em microcomputador PENTIUM 133Mhz com o *software* ALGOR [12]) foram produzidos todos os dados necessários ao treinamento da RNA.

A título de ilustração, apresentamos na Figura 3.2 a malha de MEF de um dos casos analisados, onde se pode observar a presença do raio de concordância do cordão de solda que, em última instância, funciona como elemento de atenuação do fluxo de tensões entre primário e secundário.

4. RESULTADOS

Conforme descrito nos itens 2.1 e 2.4, não existe um método consagrado para definir-se o número de nós da camada oculta. Portanto, foi necessário partir de uma configuração inicial arbitrada, com 10 nós na camada oculta. Após 40000 ciclos de treinamento, isto é, cada par de treinamento ter sido apresentado à rede 40000 vezes, o desvio médio entre os valores fornecidos pela rede e aqueles obtidos pelo modelo de elementos finitos era maior que 30%. Desta forma, outras configurações foram selecionadas, acrescentando-se um novo neurônio na camada oculta a cada nova configuração. Obteve-se, assim, uma configuração com 15 neurônios na camada oculta, com desvio médio de 2% e desvio máximo de 21%, após, aproximadamente, 20000 iterações. O tempo total para treinamento de todas as redes utilizadas foi de 240 horas, contabilizando-se as diversas paradas para alterações nas configurações.

No atual estágio da pesquisa, o principal resultado obtido está representado na figura 4.1. Trata-se da variação do FCT com o ângulo de chanfro do tubo secundário. Saliente-se que calculados nos moldes tradicionais,

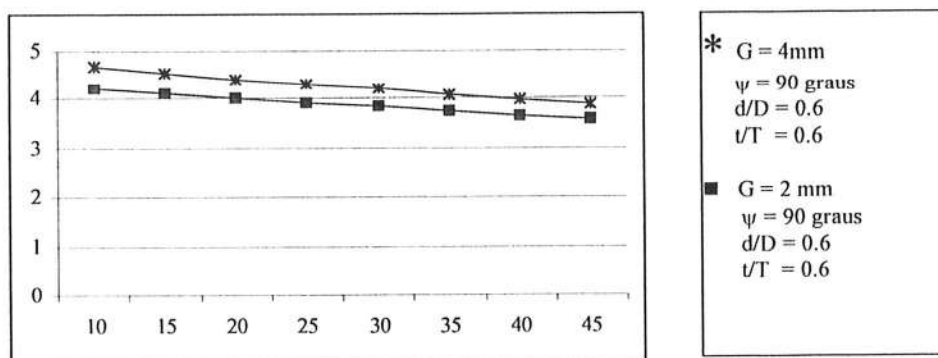


Figura 4.1 – FCT x Ângulo de Chanfro

00000

valores de FCT seriam constantes, pois tais abordagens não consideram essa variável em suas formulações.

5. CONCLUSÕES

Dos resultados obtidos fica claramente evidenciada a influência da geometria do cordão de solda no campo de tensões da junta, no sentido de atenuar a concentração de tensões, desde que *gap* e ângulo de chanfro sejam adequadamente escolhidos. Fato este não detectável nos métodos tradicionais onde, basicamente, faz-se uso de modelos elaborados apenas com elementos de casca.

A acuidade da solução obtida através da RNA ficou definida basicamente em função dos conjuntos de treinamento e, principalmente, do conjunto de teste, conforme descrito no item 2. Várias configurações de rede foram utilizadas até se chegar a uma solução satisfatória no que se refere aos desvios entre resultados calculados pelo MEF e fornecidos pela RNA.

Este trabalho é a primeira parte de um estudo que está em desenvolvimento, no sentido de fornecer uma nova proposta para o cálculo de FCT em juntas tubulares. Assim sendo, algumas questões ainda necessitam ser maturadas, como por exemplo o modo de utilização da RNA. No cálculo tradicional do FCT, por regressões, obtém-se uma ou duas expressões analíticas, juntamente com os limites de validade para as variáveis envolvidas no processo. Com as RNA, no entanto, a expressão que regula o fenômeno está implícita em um conjunto de números, na forma de pesos entre os neurônios que compõem a rede, fato este que dificulta a utilização da rede como ferramenta expedita de projeto.

6.REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Kuang,J.G., Potvin, A.B., Leick,R.D., "Stress Concentration in Tubular Joints", Proc. of 7^a Offshore Technology Conference 7, Houston, 1975.
2. Gibstein, M.B., "Stress Concentration in Tubular Joints with Diameter Ratio equal to one", Proc.of the 3rd International ECSC Offshore Conference on Steel in Marine Structures, Amsterdam, 1987.
3. Simpson, R.J. et ali, "UEG Design of Tubular Joints for Offshore Structures", Page Bros Limited, Great Britain, 1985.
4. Smedley P., Fisher, P. , "A Review of Stress Concentration Factors for Tubular Complex Joints", Lloyd's Register of Shipping, London, 1990.
5. Lippmann,R., *An Introduction to Computing with Neural Nets*, IEEE ASSP Magazine, p. 4-22, abril, 1987.
6. Haykin, Simon, "Neural Networks – A Comprehensive Foundation", Prentice Hall, New Jersey , 1994.
7. Freeman,J.A. , Skapura,D.M., "Neural Networks- Algorithms, Applications and Programming Techniques", Addison-Wesley, New York, 1992.
8. Wasserman, P.D., "Neural Computing – Theory and Practice", Van Nostrand Reinhold, New York, 1989.
9. Westead, S.T., "Neural Network and Fuzzic Logic Applications in C/C++",John Wiley & Sons, New York, 1994.
10. Rich,E. , Knight,K., "Artificial Intelligence", McGraw Hill, Singapore, 1991.
11. Massaroti, V.M., Nunes Dias, C.A., *FEM Parametric Solid Modelling for Welded Tubular Joint Analysis*, IASTED International Conference Applied Modelling and Simulation, Banff, Canada, 1997, pag.109-114.
12. ALGOR, *Finite Element Analysis System*, Algor Interactive System Inc,

200010



"Desarrollo de técnicas de modelación de artes de pesca en el Canal Hidrométrico de la Facultad de Ingeniería"



**Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental
"Prof. Ing. Oscar J. Maggiolo"
Facultad de Ingeniería - Universidad de la República**

Montevideo, Agosto de 1997.

**Desarrollo de técnicas de modelación
de artes de pesca en el Canal
Hidrométrico de la Facultad de
Ingeniería**

Ing. Jorge Freiria
Ing. Pablo Badano

Dirección del proyecto
Ing. Fritz Kuhlemann (†)
Ing. Daniel Schenzer

Instituto de Mecánica de los Fluidos e
Ingeniería Ambiental (IMFIA)
Facultad de Ingeniería - Universidad de
la República
Montevideo, Uruguay

Resumen

El proyecto "Desarrollo de Técnicas de modelación de Artes de Pesca en el Canal de la Facultad de Ingeniería" remarca como prioridad un objetivo estratégico: la consolidación de un equipo científico - técnico en torno al Canal Hidrométrico y de Pruebas Navales y Pesqueras, con la capacidad de encarar y solucionar los problemas técnicos que pueda eventualmente afrontar la flota pesquera nacional, desarrollando para ello la capacidad de modelación física de artes de pesca; se podrá ofrecer este servicio a las pesquerías nacionales y en general, a flotas pesqueras de otras nacionalidades que operan en la región.

Abstract

The project "Fishing gear modeling technics development at the

Engineering School Test Tank" involved an strategic objective: to consolidate an specialized scientific and technical team working around the Hydrometric and Test Tank. This team would be responsible of investigate all relationed with fishing gear engineering and develop this area in order to offer a technical service to national and international fishing fleet.

El objetivo inmediato de la investigación fue desarrollar técnicas acordes a esta instalación de dimensiones reducidas, y comprobar que la misma ofrecía condiciones de modelación adecuadas. Cuando se habla de desarrollar técnicas de modelación se refiere a la construcción de sistemas de sujeción y sistemas de transmisión de esfuerzos del modelo al instrumental instalado y la configuración de operaciones sistemáticas para el registro fotográfico. Una vez acondicionados todos los elementos para poder realizar los ensayos, se comprobará la aptitud del canal para la modelación de artes de pesca; esto significa determinar que los resultados obtenidos en los modelos representaran coherentemente la realidad una vez corregidos mediante los correspondientes coeficientes de bloqueo. Si bien no se planteó la determinación de estos coeficientes en esta etapa dado que se utilizó un modelo distorsionado de red, la evaluación con un modelo matemático ya comprobado permitirá definir en una primera aproximación la calidad de los resultados.

La pesca en Uruguay

A partir de principios de la década del setenta se produce un desarrollo muy importante de la flota de arrastre, debido principalmente a dos factores. Por un lado el reconocimiento por parte de los organismos correspondientes de la existencia de abundantes recursos demersales constituidos principalmente por la merluza. Por otro, la firma de la Ley de Pesca (1969) al amparo del Tratado del Río de la Plata, que posibilita la explotación conjunta con la República Argentina del llamado Frente Marítimo. Paralelamente comienzan a funcionar varios establecimientos de procesamiento de pescado que brindan una cantidad importante de puestos de trabajo. Este hecho llevó a que hoy en día la pesca sea una importante vía de ingreso de divisas al país y fuente laboral para muchas familias que dependen directa o indirectamente de esta actividad. Los recursos existentes en la zona de influencia uruguaya son muy vastos. Existen cerca de 70 especies de peces de importancia comercial, comprendiendo tanto la pesca de agua dulce (16 especies) como la de agua salada (56 especies). De todas estas especies, se cuenta con estimaciones de las biomásas explotables de forma sostenida solamente en algunos casos, como ser el principal recurso demersal, es decir, la merluza, la que se estima en 200000 ton/año, así como también de la corvina, 50000 ton/año y de la pescadilla, 40000 ton/año.

El desarrollo de las pesquerías en Uruguay se ha dado principalmente desde el año 1975, cuando se implantó el Plan Pesquero por parte de INAPE. Estas pueden ser clasificadas en dos amplios grupos: las pesquerías de altura, con una dedicación principal a la captura de merluza y calamar, y la costera, dedicada principalmente a la captura de corvina y pescadilla. Si bien es claro que la industria pesquera nacional ha aumentado en su importancia desde la implantación del plan pesquero de 1975, este desarrollo presenta ciertos altibajos. La flota pesquera también ha ido evolucionando de manera irregular, pero en la actualidad y desde hace algunos años está en proceso de crecimiento. En el año 1995 la misma estaba compuesta por 93 embarcaciones de porte mediano (más de 10 T.R.B) dedicada a la pesca costera y de altura, las cuales en promedio tenían un tonelaje de registro bruto de 236.6 T.R.B. y una potencia promedio de 706 HP. La flota artesanal en el año 1995 consistía de una importante cantidad de embarcaciones pequeñas dedicadas fundamentalmente a la pesca costera (hasta 40 millas de la costa): 865 embarcaciones de 1.5 T.R.B y 14 HP, en promedio. Se cuenta, en general, con modernos equipos de pesca, estando el equipamiento básico formado por ecosondas, navegación satelital, instalaciones de radio frecuencia, todo lo cual permite emplear las técnicas de pesca más modernas. La misma es principalmente una flota de arrastre ya que más del 90% emplea métodos y artes de pesca al arrastre en sus diversas modalidades. Los otros

métodos más empleados son enmalle, palangre y longline.

En cuanto al empleo de mano de obra, durante el año 1995 la ocupación total en el sector pesquero fue de 6294 plazas, en el sector comercial y 2773 en la pesca artesanal. Dentro del sector comercial, las plazas de la industria pesquera fueron 2823 y las plazas a bordo fueron 3471. Puede concluirse que, globalmente, en la actualidad la pesca implica fuentes de trabajo para alrededor de 9000 personas, lo que significa el sustento para tan importante número de familias. Por tanto, no resulta muy exagerado pensar que más de 30000 personas están directa o indirectamente relacionadas con la pesca en nuestro país.

Puede establecerse que el desarrollo de la pesca como actividad productiva en Uruguay se basa fundamentalmente en las ventajas comparativas que la destacan ampliamente sobre otras actividades, siendo las más remarcables las que se enumeran a continuación:

1) Gran variedad de especies, la mayoría de las cuales se encuentra sin explotar o con un nivel bajo de explotación, lo que ofrece una diversidad de oferta importante atendiendo al mercado externo y al consumo interno.

2) Existencia de una abundante biomasa explotable, que supera los varios cientos de miles de toneladas

métricas, de un recurso que tiene la característica particular de ser renovable.

3) Grandes facilidades portuarias y costeras, que favorecen tanto la navegación como la prestación de servicios o la instalación de establecimientos afines con la actividad pesquera.

Estas circunstancias, sin embargo, no han sido capitalizadas en su totalidad debido principalmente a la falta de una infraestructura nacional sólida, sobre todo desde el punto de vista tecnológico, que sirviera de soporte para el desarrollo de esta industria. A modo de ejemplo puede mencionarse que la mayor parte de la flota pesquera no fue construida en el país; por otro lado, las artes utilizadas son modificaciones de diseños de artes provenientes de países europeos (España, Alemania, Dinamarca) sobre la base de la experiencia de cada patrón de pesca; tampoco existe una buena estructuración en cuanto a la investigación de los recursos, y es escasa la investigación y desarrollo de una tecnología nacional destinada a resolver los problemas de la industria pesquera, que se sustente en una formación profesional acorde en Ingeniería Pesquera. Esta carencia está imponiendo un techo importante al desarrollo de dicha industria, lo cual genera varias situaciones que comprometen su futuro. Otros problemas se agregan a los mencionados: falta de diversificación de la explotación, existiendo una dependencia muy marcada con

respecto a la captura de la merluza para su exportación; explotación deficiente de otras especies de acuerdo a los niveles previstos de su biomasa, posiblemente debido a la aplicación acrítica de métodos y artes en uso, sin atender a las múltiples diferencias tanto biológicas como de comportamiento que existen entre las distintas especies y que juegan un papel preponderante a los efectos de su captura. La situación es aún peor en relación a ciertas especies exóticas para las que existiría un potencial mercado comprador; esto se debe a que ni siquiera se intenta realizar su pesca a nivel industrial por carecer de artes mínimamente apropiadas.

Características principales de las artes de pesca

Las artes de pesca comerciales son sistemas de ingeniería muy especiales debido a su cometido particular, a las condiciones de operación y a sus características mecánicas. El 90% de las artes usadas en la actualidad para la pesca industrial emplean como elemento principal una red y en adelante se hará referencia únicamente a este tipo de arte. Los siguientes conceptos permitirán entender ciertas características físicas de las redes como parte principal de las artes de pesca, y que se expondrán más adelante. Las redes son estructuras flexibles constituidas por hilos de fibras naturales o sintéticas, mono o multifilamento, entrelazadas entre sí y conformando un tejido abierto. El elemento más simple de la red es la malla, formada por cuatro lados o barras de hilo y cuatro nudos, cada nudo

conectando dos lados o barras y, típicamente, la forma que adopta cuando es sometida a un sistema de solicitaciones en su plano es del tipo romboidal. Cada malla de la red está rodeada por ocho mallas; cada barra separa dos mallas y cada nudo separa cuatro (fig. 1). Resumiendo, la red es una estructura flexible que está formada por un conjunto de mallas cada una de las cuales se identifican por un nudo y dos barras.

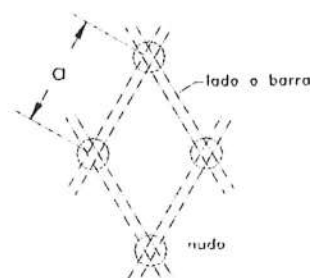


Fig. 1 - Esquema de la malla de una red.

La primer característica singular de las artes de pesca es su interacción con seres vivos, principalmente peces. Esto determinará parámetros fundamentales de las mismas, tales como el tipo de red y su material, su forma, tamaño, movilidad, etc. Por otro lado, el comportamiento de los peces en la zona de acción del arte es el problema más difícil de resolver y hoy en el mundo se están dedicando muchos esfuerzos para su investigación. Sin embargo, el éxito de las artes empleadas demuestra que su diseño se corresponde muy bien con el comportamiento de los peces y con las condiciones de pesca reales.

La segunda característica importante de las artes de pesca está relacionada con sus propiedades mecánicas. Las artes de pesca son estructuras flexibles que cambian muy

fácilmente de forma y de posición espacial. Los distintos tipos de artes de pesca, tanto las que se mueven en el agua arrastradas por alguna embarcación, como las que están fijas en las corrientes de ríos o mares, son, en principio, sistemas espaciales flexibles formados por redes, cabos y otros tipos de elementos que forman su aparejo, todos los cuales están sometidos a la acción de diferentes fuerzas durante la operación de pesca.

La red de un arte de pesca se puede asimilar en muchos aspectos a una cáscara elástica ideal cargada externamente y transmitiendo estas cargas al resto de la estructura de cabos y al sistema de amarre. No obstante esto, la deformabilidad de las artes de pesca por la acción de incluso pequeñas cargas hace que su comportamiento difiera sustancialmente de la mayoría de las estructuras y equipos de ingeniería. Cuando éstos últimos se deforman la estructura usualmente se daña o destruye, mientras que cambios de forma o de posición de las artes de pesca usualmente no disminuyen su resistencia mecánica. Más aún, los cambios de forma y posición son frecuentemente importantes para el éxito de la captura, la que depende de la habilidad de asegurar la forma requerida del equipo en relación al comportamiento de los peces a capturar. De manera que, si bien la resistencia mecánica del arte y de sus componentes es importante, más importante aún es la forma que ésta adoptará bajo las condiciones de operación.

Entonces, al diseñar un arte de pesca, debe calcularse no solamente su resistencia mecánica sino también la forma y posición espacial causada por las fuerzas actuantes. Para determinar la configuración espacial que adoptará el arte debe conocerse la carga actuante sobre cada uno de sus componentes. Tanto la eficiencia del arte como sus dimensiones y también las características de tracción del buque pesquero y de los equipos de pesca dependen de estas fuerzas. Sin embargo, la determinación de las cargas es compleja, ya que a su vez, dependen de la forma y posición, factores que se desconocen y cambian fácilmente. Los sistemas de éste tipo en que los parámetros involucrados dependen del estado se denominan no lineales, ya que los procesos que tienen lugar se describen por ecuaciones diferenciales no lineales. Estas ecuaciones no pueden ser resueltas por superposición lo que impide un estudio analítico por separado.

Las redes, que forman parte fundamental de la mayoría de las artes de pesca, y sus materiales estructurales principales tienen, además de la propiedad de ser flexibles, otras características importantes. En primer lugar, la superficie de la red no es continua dado que las mallas son elementos abiertos. La continuidad existe solamente entre los hilos que la forman y los nudos que conectan los hilos. En segundo lugar, su superficie tiene una estructura rugosa compleja que difiere entre los distintos tipos de redes. Esto es debido a que los

hilos y cabos multifilamento se construyen con cierto grado de torsión. Tanto las distintas hebras de la superficie como la torsión del propio hilo introducen cierto grado de rugosidad que debe ser tenido en cuenta desde el punto de vista hidrodinámico. En tercer lugar, las redes difieren de las cáscaras continuas y elásticas por su anisotropía, razón por la cual la misma red puede adquirir distintas formas y ocupar un área distinta dependiendo de los coeficientes de apertura, los cuales determinan la fijación de la red a la estructura de cables. Esto es en virtud de su continuidad según líneas y no según una superficie. Las tensiones que aparecen en la red debido a las cargas externas varían según la dirección considerada y dependen también de los coeficientes de apertura.

En consecuencia, el cálculo de las cargas actuantes en los hilos individuales es muy complejo. Sin embargo, el problema se facilita por el hecho de que, en muchos casos, tal cálculo no es necesario. Los parámetros del mallado (tamaño de malla, diámetro de hilos, material, dimensiones globales) se determinan principalmente por las dimensiones de los peces a capturar. Al determinar la posición del arte, no es necesario determinar las cargas actuantes en cada hilo individual. Además, la resistencia mecánica de la red durante la captura generalmente es suficiente e incluso puede llegar a ser exagerada, pero el momento crucial para determinar su resistencia es el momento del levante de la

pesca, o sea, cuando se iza o recoge la red llena de peces.

Durante la tarea de pesca el arte de arrastre se encuentra sumergido a cierta profundidad en el mar, la cual depende de las características de comportamiento de las especies que se deseen capturar. La ubicación del arte respecto del fondo marino lleva a la siguiente clasificación:

1 - Demersales o "de fondo" son las artes que se arrastran sobre el lecho marino.

2 - Pelágicas de media agua, las que se arrastran a cierta profundidad intermedia sin tocar el fondo ni la superficie del mar, por lo general hasta 10 m. del fondo.

3 - Pelágicas de superficie, las que se arrastran inmediatamente por debajo de la superficie del mar.

Debido a esta adaptabilidad del método de arrastre para ser empleado en todo tipo de condiciones, es el más empleado en todo el mundo.

La pesca de arrastre y características de las artes empleadas

En el amplio abanico de métodos empleados en la pesca industrial se destaca, por su importancia, el de la pesca de arrastre, el cual en conjunto abarca más del 70% del volumen de captura a nivel mundial. El arte de arrastre, como la gran mayoría de las artes de pesca, está

compuesta por la red como elemento principal y otros elementos que forman su aparejo, los cuales tienen la función de ayudar a que la red adopte la forma más eficiente durante la operación de pesca. La red total está construida en dos mitades: la superior o cielo, y la inferior o fondo. A su vez, tiene simetría según un plano que durante la operación de pesca es vertical y paralelo a la dirección de avance. Está conformada por varios paños de diversos tamaños de malla, más abiertos a la entrada o boca de la red y más densos a medida que se aproximan al fondo o copo donde se acumula el pescado. Estos paños, tejidos entre sí de manera que el aspecto global asemeja una bolsa que se afina hacia el copo, está reforzado por un sistema de cabos relativamente más gruesos que los hilos de la red. Estos cabos transmiten la resistencia al avance dentro del agua de los paños individuales a los cabos de arrastre y éstos al buque de arrastre. De este sistema de cabos estructurales se destacan aquellos que forman los bordes de ataque, denominados relingas: la relinga superior y la relinga inferior, también denominada calón. Por lo general, a la entrada y hacia los costados la red tiene unas prolongaciones verticales de los paños de la boca llamadas alas, que avanzan por delante de la boca de la red.

El aparejo de un arte de arrastre completo está integrado por variados elementos: sobre los bordes de ataque o relingas se colocan los flotadores o corchos a lo largo de la relinga superior, y los pesos o plomos

a lo largo de la relinga inferior. En la antigüedad para obtener una buena apertura horizontal del arte se arrastraba éste a la pareja, es decir, entre dos embarcaciones. Hoy en día este método es poco empleado por su alto costo inherente. En su lugar se utilizan los dispositivos conocidos como portones, que empleando la fuerza de sustentación o "lift" contribuye a obtener y controlar la apertura horizontal de la red. En las artes de este tipo se emplean dos portones, cada una de las cuales se coloca a un lado de la red, y se conecta, de un lado, a las alas y las relingas por un par de cabos llamados bridas y, del otro lado, a la embarcación de pesca a través de los cabos de arrastre. Cabe mencionar también los cables de arrastre que transmiten la tracción del buque, suelen tener grandes longitudes y son muy resistentes. A veces se emplea lo que se conoce como "cometa", elemento que va amarrado a la relinga superior en el plano de simetría y tiene por cometido contribuir a obtener una mayor altura de boca.

Teoría de modelación de artes de pesca

La modelación de artes de pesca de arrastre involucra el estudio de un modelo reducido del arte prototipo del cual se quiere determinar su comportamiento en ciertas condiciones durante la operación de pesca. La efectividad de estos estudios depende de la estricta observancia de las leyes de similitud, las cuales expresan relaciones entre las magnitudes físicas de modelo y prototipo que intervienen en el fenómeno a

estudiar. Las leyes de similitud de las redes empleadas en la pesca, expresadas por Tauti en 1934 y que se expondrán a continuación, se basan en ciertas suposiciones que intentan simplificar el problema de la interacción entre los distintos componentes del arte. Estas suposiciones son las siguientes:

- 1) el alargamiento de los hilos de cada malla de la red es despreciable*
- 2) los hilos de las mallas que conforman la red son perfectamente flexibles*
- 3) la ley de Newton sobre la resistencia hidrodinámica es válida para cada porción de la red, en todo el intervalo de números de Reynolds*
- 4) todo cambio en la forma de la red ocurre tan lentamente que se puede considerar que el sistema de fuerzas actuantes permanece en todo momento en equilibrio cuasi estático*

La primera regla de similitud que debe ser observada entre modelo y prototipo es la geométrica. Esto implica que los parámetros adimensionales que definen la forma de la red deben ser iguales entre ambas. Por ejemplo, las longitudes de partes correspondientes deben guardar en toda la red una relación constante. Esta relación entre cualesquiera dos longitudes correspondientes de modelo y prototipo se denomina escala de longitudes, se nota e_L , y se expresa de la siguiente manera:

$$e_L = \frac{L_m}{L_p}$$

donde L es una longitud característica de la red y los subíndices m y p denotan la pertenencia al modelo y al prototipo, respectivamente (en adelante se continuará empleado esta notación). Así, L_m es la longitud característica de la red modelo y L_p es la longitud de la red prototipo medida en el mismo lugar que L_m . Estas dos longitudes se denominan correspondientes.

La similitud geométrica planteada implica que ángulos correspondientes deben ser iguales entre modelo y prototipo, lo que se expresa como sigue:

$$\alpha_m = \alpha_p$$

donde α denota un ángulo característico de la red.

Además de similitud geométrica, entre modelo y prototipo de un arte de pesca debe existir similitud mecánica. Se establece como hipótesis que la velocidad media de arrastre permanece constante; la introducción de esta suposición significa una simplificación importante al problema de la modelación y al análisis teórico, ya que en este caso el flujo será estacionario y no habrá que introducir la consideración de las aceleraciones instantáneas que implica el flujo variado.

En esta condición de flujo estacionario, el arte como un todo alcanzará una condición

de equilibrio dinámico. Las fuerzas serán de dos tipos: externas (la gravedad y la resistencia hidrodinámica) e internas (la tensión en las mallas y el sistema de cabos estructurales). Las primeras son las que aparecen debido a la acción de campos de fuerzas externas aplicadas sobre la red, así como a la interacción de ésta con el medio que la rodea a través de su superficie. A su vez, las fuerzas internas son debidas a la reacción del material de la red que se opone a las deformaciones a que lo somete el campo de fuerzas externas. En virtud del equilibrio dinámico, las resultantes de ambos campos de fuerzas deben contrarrestarse entre sí. De esto se deduce que en condiciones de similitud mecánica, la red prototipo y su modelo estarán sometidos a un sistema de fuerzas similares cuya resultante es el sistema o torsor nulo. En esta condición se dice que los flujos en que ambas redes se mueven son similares. Este es, en definitiva, el objetivo último de la modelación física de artes de pesca, ya que, existiendo similitud entre los flujos (garantizada por la similitud geométrica y mecánica de ambos fenómenos), el comportamiento del modelo permitirá conocer cómo será el de su prototipo.

Diseño de las experiencias

Existen dos aspectos muy importantes al momento de evaluar el comportamiento de un arte de pesca. El primero a evaluar es la magnitud de la apertura horizontal y vertical para un rango de velocidades predeterminado. Por otro lado es preciso

determinar la resistencia que aporta el aparejo a la resistencia al avance global del buque, dado que el consumo de combustible determina en forma preponderante el rendimiento global de la operación de pesca, además de determinar un costo inicial que debe ser minimizado. Para ello, y como segundo aspecto relevante, se debe medir la resistencia del aparejo en las condiciones de modelación, para el mismo rango de velocidades.

El modelo empleado en los ensayos corresponde a una red de arrastre de fondo cuyas dimensiones principales se muestran en la fig. 2. La escala global de longitudes entre modelo y prototipo es $e_L = 1/35$. Dado que la finalidad de los ensayos fue desarrollar técnicas de modelación adecuadas a la instalación, las escalas para otras magnitudes fueron distorsionadas ligeramente. Se realizó un muestreo con variaciones pequeñas en la velocidad en el intervalo entre 3 y 5 nudos, extendiendo hasta 2 y 8 nudos los extremos del intervalo con variaciones de velocidad mayores midiéndose la resistencia al avance o arrastre para cada una de ellas. La geometría de la red se determina en forma gráfica mediante el análisis fotográfico. La evaluación de las dimensiones del modelo se realiza en base a una grilla centimetrada fotografiada previo a los ensayos, colocada vertical u horizontalmente según corresponda. Esta técnica permite dentro de ciertos parámetros de error, determinados fundamentalmente por la difracción de la imagen del cuerpo en el

agua, determinar las aperturas verticales y horizontales de la boca del modelo, así como las pendientes de su contorno. Fundamentalmente permite un estudio comparativo de las configuraciones que adopta un modelo al ser arrastrado a distintas velocidades, y por tanto determinar la velocidad para una mejor performance del mismo.

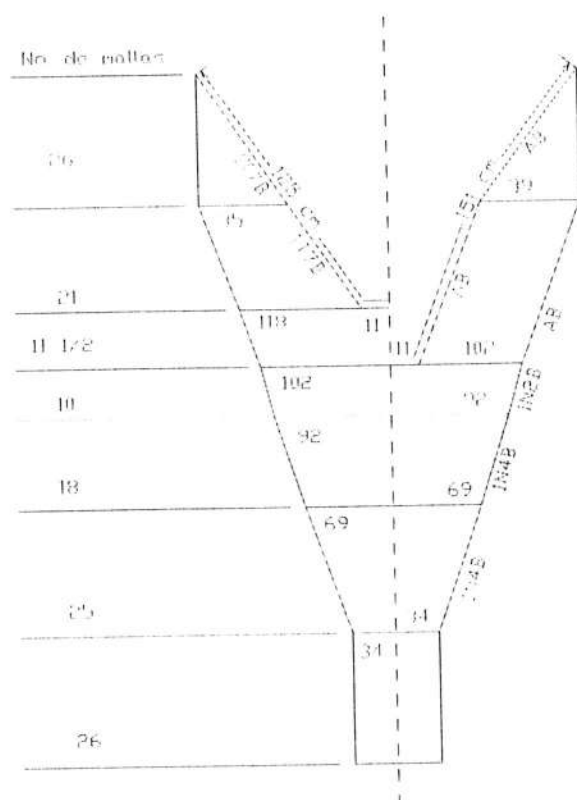


Fig. 2 - Plano de la red empleada en los ensayos, dibujado según norma de FAO.

Resistencia al avance del modelo

Tabla 1 - Resistencia al avance en función de la velocidad

Velocidad de avance (m/s)	Arrastre (grf) Promedio de ensayos 1 a 6
0.000	0.00
0.294	58.569
0.368	95.598
0.442	136.673
0.473	156.986
0.502	186.273
0.531	219.541
0.560	244.271
0.590	271.243
0.621	298.658
0.650	328.407
0.678	358.507
0.708	389.926
0.738	423.818
0.809	512.185
0.885	610.297
0.957	715.502
1.035	830.683
1.109	952.725
1.182	1084.973

Configuración geométrica del modelo

Tabla 2 - Configuración geométrica del modelo en función de la velocidad

Velocidad preseleccionada (m/s)	Apertura Vertical (boca) (cm)
0.294	22.09
0.367	21.63
0.441	20.47
0.470	19.30
0.500	18.84
0.529	18.84

Velocidad preseleccionada (m/s)	Pendiente de contorno superior (°)
0.294	12.16
0.367	11.26
0.441	10.39
0.470	9.94
0.500	9.58
0.529	9.39

Velocidad preseleccionada (m/s)	Apertura Horizontal (extremos de alas) (cm)
0.294	40.00
0.367	40.00
0.441	41.56
0.470	41.04
0.500	43.38
0.529	42.86

Velocidad preseleccionada (m/s)	Pendiente de apertura de alas (°)
0.294	11.57
0.367	13.02
0.441	11.63
0.470	11.88
0.500	10.93
0.529	11.26

Las fotografías de la página siguiente corresponden a la configuración vertical y horizontal adoptadas por el modelo en uno de los ensayos para $v = 0.5$ m/s.

Análisis de resultados: modelo matemático

A los efectos de comparar los resultados obtenidos con la modelación física, se calculó el arrastre de acuerdo a un modelo matemático desarrollado por Dickson para el modelo ensayado. A continuación se presenta un detalle sintético de dicho modelo. El área proyectada de una malla completa se calcula como:

$$\Lambda_p = 2ad \cdot \frac{a_p}{a} - \frac{d^2}{\sin 2\psi}$$

En el caso del copo, el cálculo del área total de hilo proyectada se calcula utilizando la siguiente expresión:

$$\Lambda_p = F \frac{d}{a} \cdot \frac{1}{\cos \frac{\theta}{2}} \cdot \frac{1}{\sin \frac{\theta}{2}}$$

donde F es el área del panel. Se resumen a continuación los coeficientes de arrastre desarrollados por Dickson, para tres posiciones relativas de la malla respecto al flujo; la primera posición es la normal al flujo, la segunda cuando es paralela y la última es una posición intermedia genérica. Es usual a los efectos de los cálculos considerar la siguiente expresión:

$$Q = \frac{d}{2a} \cdot \frac{1}{\sin 2\psi} \cdot \frac{1}{(a_p/a)}$$

que representa un factor de pérdida de área debido a los cruzamientos de barras que son contabilizados dos veces.

$$\alpha = 90^\circ$$

$$c_{d90} = \frac{1 - Q}{(1 - 2Q)^4}$$

$$\alpha = 0^\circ$$

$$c_{d0} = \left(\sin^3 \frac{\theta}{2} + c_f \cos^2 \frac{\theta}{2} \right) \cdot (1 - Q)$$

El coeficiente de fricción depende del material con el cual está confeccionado el hilo, y se considera normalmente $c_f = 0.07$. Finalmente, para una posición intermedia α el coeficiente de arrastre se toma, de

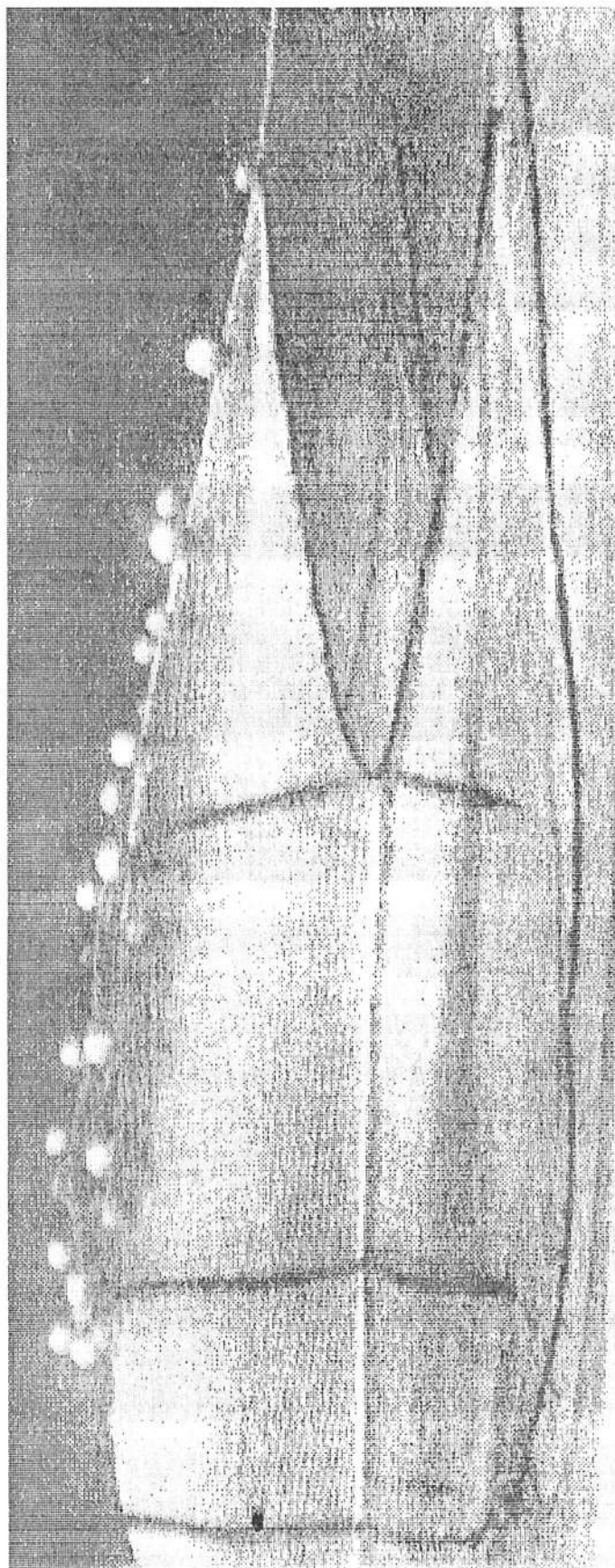


Fig. 3 - Vista lateral del modelo; velocidad 0,5 m/s.

00012

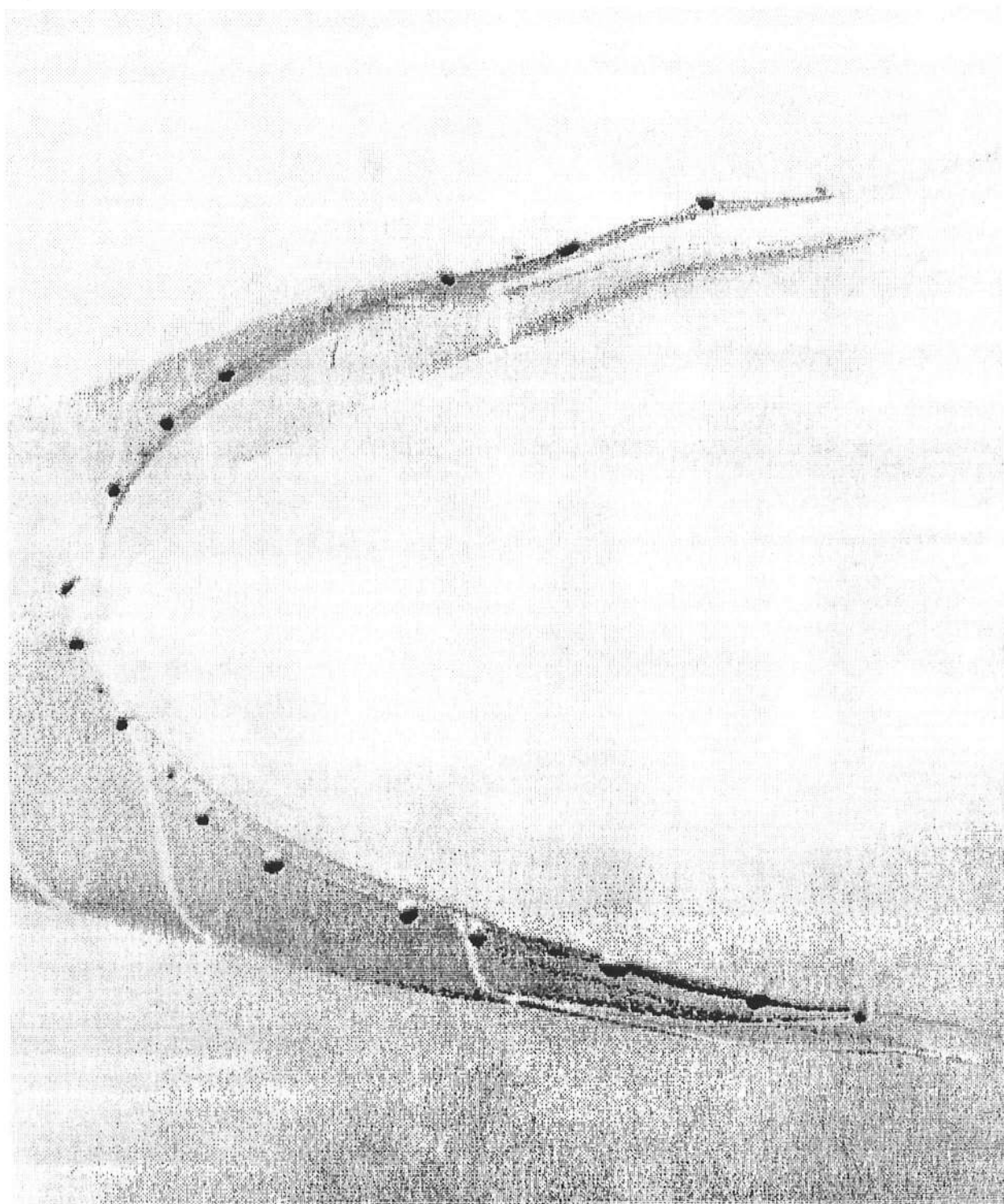


Fig. 4 - Vista horizontal del modelo, velocidad 0,5 m/s.

acuerdo a lo sugerido por Crewe (1964) como:

$$0 < \alpha < 90 \quad c_{d\alpha} = \frac{1}{2}(c_{d90} - c_{d0}) \cdot \frac{\alpha}{30} + c_{d0}$$

Los cálculos de las áreas de hilo proyectadas y los correspondientes coeficientes de arrastre deben hacerse para cada panel en forma separada. El copo de la red tiene la particularidad que normalmente contiene una porción importante del hilo total, pero como su forma es cilíndrica en lugar de cónica, no contribuye de la misma manera al arrastre que el resto de los paneles. Por esa razón su cálculo se realiza separadamente; Dickson recomienda la aplicación de la siguiente fórmula:

$$c_{d0} = \left[(u_1^3 + c_r u_2^2) \cdot \left(1 - \frac{d}{a} \right) \right] \cdot \left(1 - \sqrt{\frac{d}{a} \frac{1}{u_2}} \right)^2$$

para el caso en que se considera un modelo de malla simple sin nudos.

Para el cálculo del arrastre debido a apéndices tales como cables de relingas, flotadores y cables de tiro se utilizó la formulación desarrollada por Kowalski y Giannotti que se resume a continuación.

Arrastre de cables

$$R_{\text{lineas}} = (C_{D \text{ básico}} \sin^3 \varphi + \Delta C_D) \cdot \left(\frac{\rho v^2}{2} \right) \cdot (d_l L_l) \text{ do}$$

nde:

$C_{D \text{ básico}}$ es el coeficiente de arrastre de un cable

perpendicular al flujo, normalmente su valor se toma igual a 1.10

ΔC_D es un valor experimental igual a 0.02

d_l y L_l son el diámetro y largo del cable respectivamente

Arrastre de flotadores (esferas)

$$R_{\text{flotadores}} = n_f C_{D \text{ flot}} \cdot \left(\frac{\rho v^2}{2} \right) \cdot \left(\frac{1}{4} \pi d_{\text{flot}}^2 \right)$$

donde:

$C_{D \text{ flot}}$ es el coeficiente de arrastre de un flotador esférico, cuyo valor se toma normalmente igual a 0.47

d_{flot} es el diámetro del flotador

Tabla 3 - Valores del arrastre para distintos elementos del aparejo

velocidad (m/s)	cono	Arrastre (gr)		
		copo	flotadores	relingas
0.294	39.883	4.054	6.518	7.112
0.367	66.507	6.292	10.157	11.083
0.441	94.621	9.131	14.666	16.003
0.470	109.317	10.276	16.658	18.177
0.500	132.924	11.029	18.852	20.571
0.529	160.103	12.067	21.103	23.027

velocidad (m/s)	Arrastre (gr)	
	tiros	Aparejo
0.294	1.001	58.568
0.367	1.560	95.599
0.441	2.252	136.673
0.470	2.558	156.986
0.500	2.895	186.271
0.529	3.241	219.541

Análisis de resultados: modelo físico

El arrastre que experimenta el modelo físico, según se deduce del análisis de los resultados graficados en la fig. 3, se puede representar de acuerdo a la ecuación:

$$R \text{ (gr)} = 756,11 \cdot v^{1.6553}$$

Esta ecuación muestra que los resultados se alejan apreciablemente de una dependencia cuadrática de la velocidad. Esta discrepancia se observa normalmente en ensayos con modelos físicos, adjudicándose tal efecto a la variación importante de la geometría de la red con la velocidad o posiblemente debido a efectos relacionados con el número de Reynolds.

Tabla 4 - Valores del arrastre de acuerdo a: 1) modelo matemático, 2) modelo físico

Velocidad (m/s)	Arrastre calculado (gr)	Arrastre medido (gr)
0.294	58.6	99.7
0.367	95.6	143.9
0.441	136.7	195.0
0.470	157.0	216.7
0.500	186.3	240.0
0.529	219.5	263.5
0.558	244.3	287.9
0.588	271.2	314.0
0.617	298.7	340.4
0.647	328.4	367.8
0.676	358.6	395.5
0.705	389.9	424.0
0.735	423.8	454.2
0.808	512.2	531.3
0.882	610.3	614.2
0.955	715.5	700.6
1.029	830.7	792.7
1.102	952.7	888.0
1.176	1085.0	988.8

A su vez el modelo matemático aplicado al modelo físico muestra el siguiente resultado:

$$R \text{ (gr)} = 798,95 \cdot v^{2.1029}$$

el cual es coherente con los resultados obtenidos con este tipo de modelos matemáticos.

Conclusiones

Con relación a la investigación propiamente dicha se debe destacar el éxito en el desarrollo de una metodología adecuada para la realización de este tipo de modelación en el canal hidrométrico. Las medidas de tracción y aperturas del modelo muestran resultados verdaderamente alentadores. Se destaca, por una parte, la consistencia con resultados publicados en distintas fuentes bibliográficas, por ejemplo en lo que se refiere al valor de la potencia de la velocidad en la ecuación del arrastre, y por otra, en la coherencia que resultó de la comparación con un modelo matemático, el cual fue desarrollado en túneles con capacidad para trabajar con modelos de mayor tamaño.

Se puede concluir que esta instalación cumple satisfactoriamente los requerimientos de la modelación de artes de pesca, quedando preparada la siguiente etapa que consistirá en la determinación de los coeficientes de bloqueo aplicables a este tipo de modelación. La determinación de los coeficientes de bloqueo, que no fueron calculados debido a que se trabajó con un modelo distorsionado, permitirá la aplicación efectiva de los resultados en redes comerciales.

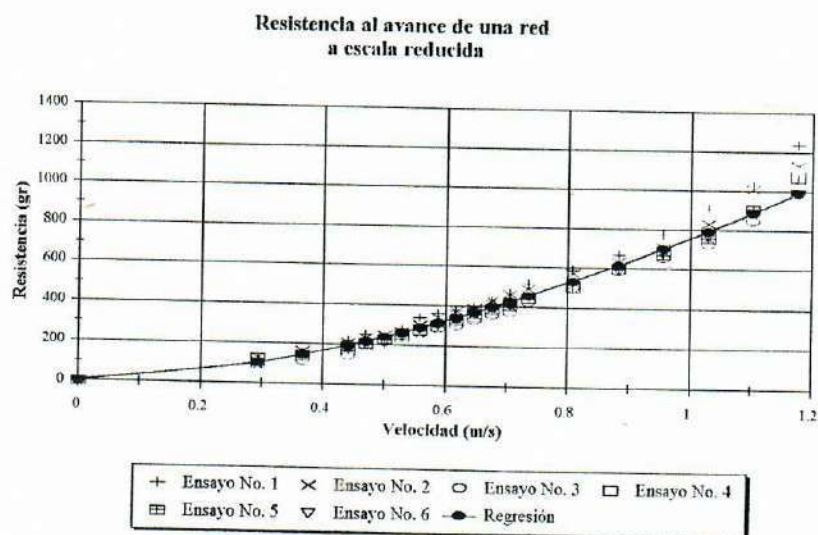


Fig. 5 - Resistencia al avance del modelo en función de la velocidad.

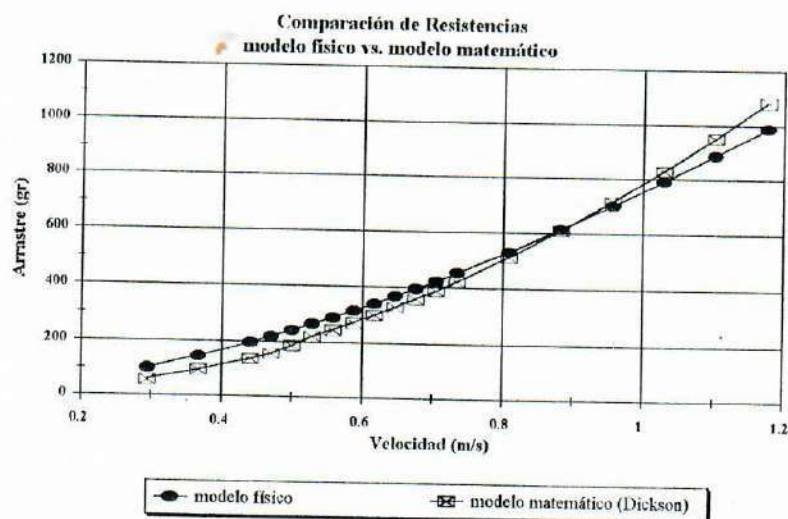


Fig. 6 - Arrastre del modelo físico y calculada según modelo matemático.

Bibliografía

1. Bas, Carlos; **Estudio de Base para el Desarrollo de las Ciencias del Mar en el Uruguay**, Comisión Oceanográfica Intergubernamental (COI), Oficina Regional de Ciencia y Tecnología de la UNESCO para América Latina y el Caribe (ORCYT), COI/INF 881, Montevideo, Uruguay, Mayo, 1992.
2. Boletín Comercial Enero Diciembre 1995; **Compendio estadístico pesquero 1975 -1995**, Ministerio de Ganadería Agricultura y Pesca, Instituto Nacional de Pesca, Montevideo, Uruguay, 1996.
3. Pope, John; **Estudios sobre poblaciones de peces: teoría y técnicas**, Proyecto URU/78/005 FAO/PNUD, Montevideo, Uruguay, 1980.
4. Fridman, A. L.; **Theory and design of commercial fishing gear**; Israel Program for Scientific Translations, Jerusalem, Israel, 1973.
5. Kawakami, Tasae; **Development of mechanical studies of fishing gear**, Modern fishing gear of the world, Fishing News Ltd, 1958.
6. Núñez Basáñez, José F.; **Hidrodinámica de las artes de pesca. Ensayos con modelos**, Revista Ingeniería Naval, N° 656, pp. 60 - 82, España, Febrero, 1990.
7. Kawakami, Tasae; **The Theory of designing and testing fishing nets in model**, Modern fishing gear of the world, Fishing News Ltd, Junio, 1964.
8. Watanabe; **Theory and Practice of Modelling Trawl Fishing Gears**, 1964.
9. Goldsztejn, Eduardo; Badano, Pablo; **Diseño y Construcción de un Canal de Usos Múltiples**, Memorias del XIV Congreso Latinoamericano de Ingeniería Hidráulica, Tomo III, pp. 1753-1765, Montevideo, Noviembre, Uruguay, 1990.
10. Okonsky, S.L.; Martini, L.W.; **Artes y métodos de pesca**; Proyecto PNUD/FAO CEPM 18, México, 1976.
11. Badano, Pablo; Freiria, Jorge; **Calibración del Canal Hidrométrico de la Facultad de Ingeniería**; Memorias del 2do. Simposio Brasileiro de medición de caudal, San Pablo, Brasil, Marzo, 1995.



“DESEMPENHO HIDRODINÂMICO DE EMBARCAÇÕES FLUVIAIS”

Giuliana Bonatelli Dario, Toshi-ichi Tachibana

Departamento de Engenharia Naval e Oceânica da Universidade de São Paulo

e-mail : giuliana@usp.br , tatibana@usp.br

IPEN XV COPINAVAI Meeting
Montevideo - Uruguay
11 - 14 Nov. 1997

RESUMO

O trabalho apresenta uma análise hidrodinâmica das principais embarcações fluviais, os empurradores, chatas e comboios das mesmas, e autopropelidos, que poderão facilmente ser adaptados às condições de projeto de integração do Mercosul.

Para tanto, são apresentados os parâmetros principais necessários para um projeto hidrodinâmico. Seus resultados são representados em função das dimensões principais, seus coeficientes geométricos e restrições das vias navegáveis.

ABSTRACT

This paper presents a hydrodynamic analysis of the principal inland vessels, such as tugs/pushers, barges and their convoy, and self-propelled vessels, which can be easily adapted to the conditions of the Integration project of MERCOSUL.

For this, it presents the main parameters for hydrodynamic design. The results are based upon the dimensions of the hull, the geometric coefficients and waterway's restrictions.

1- INTRODUÇÃO

O projeto do Tietê-Paraná tem muitas fases, mas um dos fundamentos é o desenvolvimento completo de um moderno

sistema de transporte intermodal através de uma ampla região.

Os rios Tietê-Paraná e Paraguai formam o eixo do sistema intermodal de Transporte do Mercosul.

O rio Tietê-Paraná é uma união natural de São Paulo ao Oceano Atlântico, através de uma rica região agrícola no oeste do Brasil; por outro lado, este sistema cobrirá grandes distâncias tão longe como Assunção, Montevidéo, Buenos Aires e o Mar. É por isto que também é conhecido como : “Sistema de transporte através do coração do Mercosul - Mercado Comum do Cone Sul”.

A crescente necessidade de buscar-se o barateamento do custo do transporte de cargas como grãos, minérios, combustíveis, etc., tem motivado um crescimento do número de embarcações nas várias hidrovias brasileiras.

A imensa maioria das informações técnicas e estudos para subsidiar projetos é apropriada para embarcações marítimas, havendo pouco material bibliográfico relativo a projetos de embarcações fluviais. Uma das razões deste descompasso é que o projeto de embarcações fluviais, além de depender de fatores como missão, autonomia e capacidade de carga, como ocorre com o projeto de embarcações marítimas, também depende das especificidades da via onde cada embarcação irá operar. Ou seja, elaborar um projeto otimizado de uma embarcação para

navegar em uma determinada via fluvial acaba sendo um problema local ou regional.

As características físicas da via fluvial são determinantes para o projeto das embarcações que irão nela operar. Assim, aspectos do efeito de águas rasas, como restrições de calados e de larguras, raios de curvaturas mínimas do canal navegável, presença de correntezas, aproximações de eclusas, cruzamentos de embarcações em espaços relativamente restritos, levam a preocupações específicas que interferirão no projeto dos sistemas, de uma forma completamente diferenciada das embarcações marítimas convencionais.

O presente trabalho de pesquisa teve a finalidade de propor alguns procedimentos e métodos para auxiliar o projeto de embarcações fluviais que operarão em vias brasileiras, tomando como base os métodos de auxílio a projetos de embarcações convencionais, onde já se encontra automatizadas algumas considerações aqui abordadas.

2- Concepção das Embarcações

Respeitando as características peculiares de cada uma das embarcações, são apresentadas e resultados de análise dos seguintes itens do projeto de embarcações fluviais:

- **Dimensões Principais;**
- **Análise de Resistência;**
- **Propulsão;**
- **Estabilidade.**

No entanto, antes de apresentar os resultados, há a necessidade de uma análise prévia das características básicas de cada uma das embarcações que são objetos do presente trabalho.

2.1) Automotores :

Possuem propulsão própria e capacidade de transporte de cargas pesadas e diversas. Apresentam peculiaridades que os distinguem das embarcações marítimas

convencionais, trabalham em geral com restrição de profundidade ; em locais onde a presença de ondas é constante, como lagos extensos e baías, apresentando, nestes casos, melhor comportamento que os comboios fluviais. São características da região sul do país (Lagoa dos Patos) e são freqüentes na navegação da calha principal do rio Amazonas; onde o transporte fluvial é quase exclusivo e onde é empregado no transporte misto de cargas e passageiros; são ainda, bastante comuns nos rios europeus e norte-americanos, e têm se mantido como uma alternativa ao sistema chatas - empurrador.

Os automotores também podem ser utilizados em determinados trechos de navegação de cabotagem, atuando como veículos de integração com o transporte fluvial.

2.2) Chatas :

Embarcações de pequeno calado, sem propulsão própria e com capacidade de transporte de cargas pesadas. Como não tem autonomia para se locomoverem, são empurradas/rebocadas por embarcações denominadas empurradores/rebocadores. São a forma mais simples de embarcações, a simplicidade das suas linhas decorrem do fato de navegarem sempre em velocidades relativamente baixas, com pequenos números de Froude, nas quais a formação de ondas é menos pronunciada. Por outro lado, a perspectiva de compor comboios, altera o conceito de formas finas, com baixos coeficientes prismático e volumétrico, ou seja, navegando isolada, a chata pode ter bom desempenho hidrodinâmico, mas quando integrada com outra ou outras, pode apresentar rendimento menor.

Algumas restrições geométricas importantes sem dizer das condições do meio, por exemplo correnteza, para a definição das dimensões das chatas são resultantes das características da via navegável, principalmente as profundidades, larguras e

raios de curvaturas dos canais de navegação, os vãos e alturas das pontes que cruzam os rios e as dimensões das eclusas de transposição de barragens. Na figura 1 apresenta-se o comboio tipo Tietê.

2.3) Empurradores :

Embora o papel do empurrador fluvial se assemelhe ao de rebocadores marítimos, ou seja, não passa de um “cavalo mecânico”, as formas de um e de outro são bastantes diferentes pelo fato de existirem restrições severas de calado nos empurradores fluviais. Como opera a ré das chatas na maior parte do tempo há a necessidade de se considerar o conjunto do comboio resultando em formas bastantes características em função da hidrovia. Suas dimensões podem ou não depender da hidrovia; em rios como o Amazonas, certamente existirão poucas restrições de dimensões máximas, o que permite uma ampla liberdade neste aspecto. Em outros rios como o Tietê/Paraná, onde existem restrições de profundidade e/ou navegação através de eclusas as dimensões ficam limitadas pelo comprimento útil da eclusa e pelo porte das chatas, o calado em geral fica limitado pela profundidade da hidrovia. Como ilustração são apresentados na figura 2 empurradores típicos utilizados na navegação americana, européia e ex-União Navegação, com o intuito de mostrar empurradores quinados, de formas curvas, bi e tri-hélices e com popa em semi-túnel.

3- Dimensões Principais

Os primeiros passos da espiral de projeto são as definições das dimensões principais mais importantes para a concepção da embarcação; pois é nela que se decide as formas e todos os parâmetros que influem na resistência hidrodinâmica do casco, bem como na consideração das restrições físicas da via e os requisitos do armador.

As dimensões principais aqui consideradas são :

A1- Comprimento (L);

A2- Boca (B) ;

A3- Calado (H);

A4- Pontal (T) ;

A5- Deslocamento(∇)

A6- Coeficientes de Forma .

É uma tendência natural de cada hidrovia estabelecer embarcações padrões ou embarcações tipo. Esta padronização tem a vantagem de facilitar tanto os aspectos de construção quanto de operação, manutenção e reparo, tendo desta forma um sistema hidroviário mais eficiente, indicando tendências a padronização dos diversos trabalhos necessários para operação de uma hidrovia.

Apesar do item padronização ser importante, foram analisadas as várias formas de embarcações e, comparando as formulações usadas pelos diversos autores estudados (Latorre, Bari, IPT e outros), obteve-se algumas fórmulas relevantes aplicáveis às hidrovias brasileiras que poderão auxiliar na automação de projetos levando a sistemas mais eficientes e competitivos a outros meios de transportes.

A.1- Comprimento (L):

Empurradores:

i)Latorre :

$$L = 62.0 + 75\chi - 0.235\chi^{1.8} \text{ (ft)} \quad (1)$$

(50 < L < 200), (3.0 ≤ χ ≤ 32.4)

χ - (BHP/número de eixos) / 100.0).

Assim para bi-hélices de potência 2400HP, o resultado preliminar de comprimento é L = 131.4 ft ou

L = 40.0 m .(figura 3)

Chatas:

i) Bari :

$$L_{pp} = 4.356 * \nabla^{1/3} \quad (2)$$

Esses dados foram obtidos da análise da figura 4, das chatas de Bangladesh.

ii) IPT :

$$L = 0.5326\nabla^2 - 13.821\nabla + 250 \quad (3)$$

(20 < L < 100)

Obtido da regressão dos resultados de diversas embarcações ensaiadas no laboratório do IPT[4].

Automotores :

i) Bari :

$$L_{pp} = (4.9878 V^{1/3} + 20.80) / C_b^{1/3} \quad (4)$$

Formulação aqui apresentada porque as dimensões principais dos automotores considerados por Bari se aproximam muito com as dimensões dos automotores do Brasil,

ii) IPT :

A partir dos dados apresentados na referência 6, foi feita uma regressão que fornece valores típicos de comprimento de automotores em função do deslocamento, de forma análoga a obtida por Bari.

$$L = 0.8166 \nabla^2 - 27.38 \nabla \quad (5)$$

(10 < L < 120)

A.2- Boca :

Empurradores :

De acordo com a referência [1] Bari apresenta todas as dimensões preliminares usadas para empurradores, em função do comprimento. Assim, pode-se chegar a uma boca compreendido entre $2 < B < 10$ (figura 5). No entanto na prática a sua escolha é mais em função das dimensões das chatas e o volume necessário para acomodar o motor necessário para a propulsão do comboio.

Chatas :

i) Bari :

$$B = 0.235 L_{pp} \quad (6)$$

ii) IPT :

$$B = 0.1418 L + 4 \quad (7)$$

(4 < B < 20)

É importante notar que, em rios canalizados, a definição da boca das chatas deve sempre levar em consideração as formações dos comboios, resultante da análise econômica e as restrições das vias em que deverão operar (larguras das câmaras de eclusas, vãos de pontes, etc.). Por exemplo, na hidrovia Tietê a menor largura da câmara de eclusa é 11,76 m o que fez escolher a boca máxima do comboio até 11m em função das operações

exigidas dentro da eclusa e outras restrições existentes na via.

Automotores :

i) Bari :

$$B = \left((1.8443 (V / L_{pp} C_b^{1/3}) + 0.249) / C_b^{1/3} \right) \quad (8)$$

Na figura 6, Bari apresenta uma relação entre a boca calculada, através da equação 8 e a boca real da embarcação onde pode-se verificar os desvios encontrados na formulação.

ii) IPT :

A partir da referência 6 (figura 7) foi feita uma regressão de uma curva média que nos dá os valores típicos de comprimento de boca de automotores em função do comprimento.

$$B = 0.1786 L \quad (9)$$

(4 < B < 20)

A.3- Calado:

Trata-se de um item difícil de indicar parâmetros ou fórmulas, pois depende basicamente das restrições físicas da via navegável e representa um dos mais importantes nesta fase do projeto, já que deve-se aproveitar ao máximo permitido pelas condições físicas da via e nas dinâmicas do escoamento em águas rasas. Apesar disto, são apresentadas algumas formulações elaboradas a partir dos dados do IPT para orientação da escolha deste parâmetro.

Automotores

Nota-se (figura 8) grande dispersão dos pontos pois essa dimensão depende muito das características da via.

$$H = 0.0337 L + 0.2045 \quad (10)$$

Empurradores:

O calado do empurrador não é aqui abordado porque deverá integrar o comboio com as chatas, e este, desde que não seja maior que o das chatas não deverá apresentar problemas.

Chatas

A referência 5 (figura 9), apresenta relação de vários valores de calados de várias

chatas em função do comprimento, para algumas das vias que são os calados dos respectivos rios citados acima de alguns outros.

A.4- Pontal:

Este parâmetro depende basicamente do tipo de carga (o pontal é maior para embarcações de cargas de baixo fator de estiva), das relações com o calado e da borda livre exigida e outras restrições físicas da via, tais como na eclusagem e passagem sobre a ponte.

A.5- Deslocamento :

Empurradores:

O deslocamento normalmente é consequência dos outros parâmetros e o volume necessário para alojar o motor que propulsionarão conjunto; no entanto Bari apresenta como $\nabla = 250$ tons um padrão para dimensões principais (L, B, H) das embarcações-tipo de Bangladesh.

Chatas :

i) IPT :

A referência 5 (figura 10) apresenta uma relação C_b x Deslocamento onde o valor do deslocamento está compreendido entre $250 < \nabla < 4500$ (tons), que poderá auxiliar na definição da embarcação.

ii) Bari :

A figura 11, mostra a variação do deslocamento x peso leve em relação a todos os tipos de embarcações estudados por Bari ($100 \text{ t} < \nabla < 800 \text{ t}$).

Assim, nota-se nas figuras que o deslocamento de chatas também são funções das restrições físicas da via e resultado da análise econômica. Neste item, deve-se aproveitar o deslocamento máximo permitido em função do número de Froude do calado ou da profundidade do local, que influencia no escoamento ao redor da chata/comboio.

Automotores :

Para este item, somente a fórmula de Bari mostrou-se como informação orientativa :

$$\Delta = 1.281 * DWT + 7.726 \quad (11)$$

A.6- Coeficientes de forma :

A análise dos coeficientes de forma só tem sentido nos automotores, pois os coeficientes das chatas são consequência dos outros itens em função do número de Froude anteriormente citados.

a) para C_b , duas concentrações principais de valores, um em torno de 0.60 e outro em torno de 0.80;

b) para a relação L/B em função do comprimento duas linhas de crescimento;

c) com relação a tendência B/H é de maior dispersão;

d) a relação comprimento-deslocamento tende a estabilizar-se para comprimentos maiores, em valores entre 6 e 7;

e) a relação C_{wl} em função de C_p mostra uma concentração de valores em torno de C_{wl} de 0.7 a 0.8.

4- Análise de Resistência

4.1- Observações Iniciais

É apresentada a resistência à propulsão procurando fornecer meios de estimar este valor em função das características de forma, e ainda orientações gerais para elaboração das linhas do casco.

É o item mais importante, já que este deverá definir a máquina propulsora (motor), assim o dimensionamento inadequado poderá repercutir durante a vida da embarcação, podendo resultar empreendimento de retorno má ao armador, viabilizando a empreitada em alguns casos.

Automotores:

Devemos considerar três aspectos principais:

I. a embarcação deve ter capacidade mínima de velocidade para vencer as correntezas do rio onde irá operar. Como não existe um requisito único e geral, mas particular para cada rio, o projetista deve conhecer as características hidráulicas do rio, ao longo do trecho de operação e sua variabilidade longo do ano;

II. a embarcação deve ter distância de parada brusca, utilizando a reversão dos propulsores, relativamente pequena, devido a segurança da nevegação. A prática nos nossos rios é para embarcações com $L > 86$ m, operando carregadas e em velocidade de máxima de parada de 3 vezes o seu comprimento;

III. a embarcação deve ter boa manobrabilidade. Com relação às velocidades de acionamento de lemes sugere o valor de 4 graus/s.

O cálculo da resistência de automotores poderá ser realizado como se navegassem em águas profundas através de séries sistemáticas, hoje, em sua grande maioria, já automatizadas, que mais se aproximem das linhas dos cascos. Posteriormente, devem ser efetuadas as correções devido ao efeito de águas rasas, tais como o apresentado em PNA[09], através de curvas de Schilichling que fornece a correção na velocidade em função do $(\sqrt{A_x/h})$ versus $V^2/g h$, onde A_x = área da seção mestra; h = profundidade local; V = velocidade do automotor; g = aceleração da gravidade (figura 12), que tem fornecido bons resultados.

Empurradores :

Os empurradores deverão estar na esteira da chata ou de seu comboio, assim a resistência deverá ser uma porcentagem a acrescentar sobre o das chatas. Assim, Bari apresenta, como sugestão para este acréscimo, a seguinte formulação :

Bari:

$$R = 0.07289 * e^{\left(\frac{1.45}{H-T}\right)} * V^{2.0} * T^{\left(0.60 + \frac{50}{W-B_F}\right)^{0.38}} * L_F^{0.38} * B_F^{1.19} \quad (12)$$

$$\text{onde } L_F = L * N.C ; B_F = B * N.R \quad (13)$$

Chatas:

Na figura 13, observa-se as várias formas típicas de chatas que Roorda lista (1957)

Na maior parte dos casos, as chatas são utilizadas em conjunto, através de

formação de um comboio composto por um empurrador e de uma determinada quantidade de chatas, compatível com as restrições geométricas da via e com a potência disponível do empurrador. Para a formação de um determinado comboio, são colocadas chatas lado a lado (em paralelo) ou em série (em linha), o que resulta em uma embarcação com características completamente diferentes daquela formada por uma chata isolada. Daí a importância de se prever formas que facilitem a integração entre chatas, levando em conta o número e a disposição de chatas ótimos para determinada via navegável. Se as chatas vão ser utilizadas em linha ou paralelo, é imprescindível que tenham formas que permitam unir-se entre si sem deixar grandes descontinuidades geométricas, as quais fatalmente levarão a acréscimos de resistência. Nota-se também que a formação em paralelo apresenta maiores resistências hidrodinâmicas que a formação em linha, assim como várias chatas em linha tendem a ter menor resistência que a multiplicação de seu número pela resistência de uma chata isolada.

Estudos experimentais de laboratório e dados de campo permitiram deduzir as seguintes considerações para a resistência hidrodinâmica das chatas isoladas, que são úteis no desenvolvimento das linhas:

a) A altura livre da superfície da água à chapa de encosto de vante deve ser tal que evite o empilhamento da água na velocidade de operação. Deve-se evitar também que a água embarque pela proa. Isto é tanto mais válido quanto maiores forem as velocidades.

b) O raio de concordância do fundo entre corpo de vante e paralelo médio tem a importância maior que o ângulo de inclinação do fundo do corpo de vante.

c) Raios crescentes no bojo tendem a diminuir a resistência à propulsão. Mas deve-se evitar raios maiores que o calado leve, pois assim minimiza-se o

escorregamento lateral, quando navegando nesta condição. Na maioria dos casos este limite está em torno de 30 cm.

d) Raios de curvatura na bojo do corpo de vante tendem a melhorar a escoamento diminuindo a resistência.

e) A inclinação do corpo de saída deve ser mais suave que o corpo de vante, aumentando-se os raios de concordância a fim de minimizar os efeitos de separação. A inclinação máxima permissível estaria entre 22 e 23 graus.

f) Introduzindo-se uma altura de fundo no corpo de vante produz uma redução na resistência.

g) Um estreitamento lateral do corpo de vante produz uma redução na resistência. Mas, para utilização em comboios este afilamento é desfavorável.

h) Para chatas de maior velocidade (8 a 12 nós), introduzindo uma imersão da chapa de encosto de popa de cerca de 15 cm, tem-se uma redução na resistência ao avanço.

i) A variação de Cr (coeficiente residual) em função de L/B (comprimento x boca), observa-se a tendência de diminuição de Cr com o aumento de L/B, como nas demais embarcações.

j) A relação Boca-Calado (B/H), que nos indica a forma da seção mestra, é muito difícil se prever o que acontecerá com o coeficiente de resistência residual, ao se aumentar B/H, pois seu aumento levará a superfícies molhadas maiores, o que poderá ou não compensar aumento de resistência residual.

k) Em se tratando de chatas isoladas em condição leve, percebe-se tendência de diminuição de Cr com aumento de B/H, porém quando se analisa somente embarcações na condição carregada, observa-se uma grande dispersão.

l) Em todas as relações analisadas, houveram grandes variações de Cr para um valor de um determinado adimensional (ou Cv., ou L/B, ou B/H), o que nos indica que além destes, outros fatores estão influenciando na determinação do

coeficiente de resistência residual Cr. Entre outros fatores, as formas do corpo de entrada e de saída, bem como o tipo de proa e o raio de concordância entre o corpo de vante e o fundo da chata.

4.2- Resistência

A partir das considerações acima, são sugeridas três equações para calcular a resistência :

por **HOWE**:

$$R = e^{\left(\frac{1.46}{H-T}\right)} * V^2 * T^{\left(\frac{0.6+50}{W-B}\right)} * L^{0.38} * B^{1.19} \quad (14)$$

por **Bronzini**:

$$R = r * V^2 \quad (15)$$

onde :

$$r = 0.0118 B_c H^{\frac{2}{5}} \left[L_c + 70.5 + \left(1 - \frac{L_c}{328} \right) * \sqrt{\frac{C_B}{(1 - C_B)}} \right] * K_C * n * K_F \quad (16)$$

onde :

$$K_C = 2.42 C_B^2 - 3.43 C_B + 1.34 \quad (17)$$

$$K_F = 1.0 \text{ (chatas isoladas)} \quad (18)$$

por **Schale**:

$$EHP = 5.113 * 10^{-5} * D * \left(\frac{L}{B} \right)^{-0.473} * V^{3.46} \quad (19)$$

Restrições para aplicação da fórmula de Schale:

- Le : em torno de 20% de L;
- Ls : em torno de 10% de L;
- calado da ordem de 3m;
- profundidade igual ou superior a 5 vezes o calado;
- coeficiente de bloco em torno de 0.9.

Foi feita uma comparação entre os dados de ensaios de resistência ao avanço da chata do Comboio do Rio Araguaia e estas formulações, chegando-se para faixas usuais de velocidade de operação, a resultados com as três formulações foram bastantes satisfatórios, o que leva a crer que

se possa utilizar para estimativas preliminares de resistência.

5- Propulsão :

A principal característica dos propulsores de embarcações fluviais é a necessidade de adaptação à operação em profundidades pequenas, com deslocamentos relativamente grandes, ou seja, os propulsores tem que operar com altos carregamentos, que resultam da combinação de pequenos diâmetros com altos empuxos. De modo semelhante, há uma influência do "fator fluvial" (águas rasas, formas cheias, grandes bocas, etc...) sobre as distribuições de velocidades e pressões ao longo dos cascos e, principalmente nas regiões dos propulsores, alterando de maneira significativa as forças de resistência ao avanço e os coeficientes propulsivos das embarcações.

Altos carregamentos significam baixas eficiências dos propulsores, em uma faixa situada entre 25% e 45%. Assim, por ser um *aspecto crítico*, a eficiência do propulsor adquire uma importância vital para o desempenho de uma embarcação fluvial, apesar de tal fato não despertar a devida atenção da maioria dos armadores fluviais brasileiros, tendo assim um sistema de transporte inadequado o que muitas vezes levam a condenar até o sistema em detrimento aos outros sistemas de transporte. Apresenta-se a seguir a relação dos propulsores indicados para automotores e empurradores, visto que as chatas não apresentam propulsão própria.

As opções dos tipos de propulsores para automotores e empurradores não divergem das opções para embarcações marítimas de pequeno e médio portes: hélices convencionais de passos fixos (Série B-Troost), hélices em dutos (Série Kaplan), hélices de passo controlável, hélices de eixo vertical, etc. Contudo, dadas as características da nossa navegação fluvial, que exige baixo custo de investimento,

facilidade de manutenção e a maior eficiência hidrodinâmica possível, apenas dois tipos de propulsores tem sido mais utilizados: os hélices convencionais e os hélices em dutos, sendo este último utilizados também como protetor de hélice necessários devido as condições de contorno críticas que a navegação fluvial impõe.

Os hélices convencionais são os mais conhecidos e utilizados, apresentam como maiores vantagens o baixo custo de fabricação e a quantidade de informações acumuladas e disponíveis para o seu projeto adequado. Os hélices em dutos, cujos projetos também derivam dos estudos do NSMB em Wageningen, apresentam custos um pouco maiores que os hélices convencionais na maior parte da faixa de operação das embarcações fluviais.

Do ponto de vista estritamente hidrodinâmico, seria recomendável que fossem utilizados, na maior parte dessas embarcações, os hélices em dutos, já que a presença do duto representa um ganho de eficiência em baixas velocidades e uma melhor uniformização do campo de velocidades do hélice, desde que seja elaborado adequadamente, caso contrário poderá ocorrer exatamente o contrário, maior resistência e eficiência pior do conjunto propulsor (hélice+duto+casco).

Os cálculos deverão seguir os procedimentos normais de projeto, considerando-se a potência efetiva em águas rasa, bem como as eficiências propulsivas nestas condições de escoamento restritivas.

6- Estabilidade:

De forma geral, devido às suas formas relativamente cheias, com altos coeficientes de bloco, fundos chatos e grandes bocas, tanto as chatas como os automotores tendem a não apresentar problemas de estabilidade quando consideramos as cargas gerais.

Assim as aplicações dos critérios de estabilidade consagradas para embarcações marítimas poderão ser suficientes. Praticamente, pode-se afirmar que a estabilidade destas embarcações poderá constituir-se em problema apenas na hipótese de haver um carregamento com distribuição completamente inadequada de suas cargas ,ou de seus passageiros, pertences e acessórios - tal fato é facilmente evitável através da elaboração de recomendações de procedimentos de carga e descarga, o que, aliás, é necessário para todos os tipos de embarcações, fluviais ou marítimas.

Por outro lado, a estabilidade dos empurradores, principalmente navegando escoteiro (fora do comboio), merece atenção especial, devido, principalmente, às suas características de pequeno comprimento, baixos calados e altas potências instaladas. É importante notar que os empurradores possuem áreas vélicas relativamente grandes assim como são levados a realizar manobras bruscas com curvas de pequeno raio. Estes dois fatores dinâmicos (força lateral de vento e curvas "fechadas") podem, em condições operacionais desfavoráveis, aumentar o risco à integridade de uma embarcação que não tenha uma margem satisfatória de estabilidade estática.

Assim é apresentada a análise somente para empurrador .

Bari analisou que há várias formulações para garantia da estabilidade de empurradores em diferentes países. Entretanto, considera a fórmula de Simpson satisfatória. Tal fórmula calcula um valor de boca B para garantir-se um valor de altura metacêntrica GM que satisfaça aos critérios de estabilidade:

$$B = \left[KM - \left[T \left(\frac{(5C_{wp} - 2C_B)}{6C_{wp}} \right) \right] \frac{T}{mx} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (20)$$

$$GM = KB + BM - KG \quad (21)$$

A faixa de estabilidade de um empurrador é muito importante. Para o empurrador, a faixa de estabilidade positiva pode ser de até 70 graus.

No projeto final, ela é adotada para garantir uma adequada borda-livre. Pelo critério de Simpson deve-se ter uma borda livre mínima igual a 10% da boca. Uma limitação é incorporada como segue abaixo:

$$f \geq 0.10 \cdot B \quad (22)$$

7- SIMBOLOGIA

- A_x - área da secção mestra;
- V - velocidade do automotor ;
- α - ângulo de mudança de rumo em graus.
- B - boca moldada.
- C_b - coeficiente de bloco .
- C_r - coeficiente de resistência ao atrito
- $$C_f = \frac{R_f}{(0.5 \cdot r \cdot S_m \cdot V^2)}$$
- C_r - coeficiente de resistência residual
- $$C_r = \frac{R_r}{(0.5 \cdot r \cdot S_m \cdot V^2)}$$
- C_t - coeficiente de resistencia total
($C_t = C_r + C_f$)
- C_v - coeficiente volumétrico ($C_v = \nabla / L^3$)
- C_{ws} - coeficiente de superfície molhada
($C_{ws} = S_m / L^3$)
- f - mínima borda-livre.
- g - aceleração da gravidade
- L - comprimento na linha d'água .
- L_{pp} - comprimento entre perpendiculares.
- P - profundidade.
- R - resistência total .
- R_r - resistência de atrito.
- S_m - superfície molhada.
- D - deslocamento.
- χ - fator de potência
- GM - altura metacêntrica.
- BM - raio metacêntrico
- KB - posição vertical do centro de carena.
- KG - posição vertical do centro de gravidade.
- C_t - coeficiente de carregamento do hélice

D - diâmetro do propulsor
 L - comprimento total
 NZ - número de eixos
 P - passo do propulsor
 H - calado
 x - BHP/(100 NZ)
 w - coeficiente de esteira efetiva
 ∇ - volume de deslocamento
 ρ - densidade d'água
 η_D - eficiência propulsiva
 DWT = dead weight
 IPT = Instituto de Pesquisas Tecnológicas.

8- AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a todos do IPT e EPUSP que direta ou indiretamente auxiliaram na presente pesquisa e na ordenação de informações, ainda pelo incentivo fornecido para a efetivação até o momento.

Ainda os reconhecimentos de gratidão pelo apoio à pesquisa fornecidos pela FAPESP-Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo e a CAPES-Coordenadoria de Pós Graduação do Ministério da Educação e Cultura.

9- BIBLIOGRAFIA

- [1] BARI, A., CHOWDHURY, K. H. - "Design Of Small Inland Commercial Vessels". International Shipbuilding Progress, 36, n° 405 - 1989.
- [2] CHRISTOPPOULOS, B., LATORRE, R. - "River Towboat Hull and Propulsion". Marine Technology, Vol. 20, n° 3, July, 1983.
- [3] MARCHAL, J. L. J. - "Avant-Projet de Navire"- Université de Liège - Faculté des Sciences Appliquées - L. H. C. N. 1988.
- [4] HIRATA, K.; PADOVEZI, C. D.; Gonçalves, A. L. "Projeto Hidrodinâmico de Chatas In. : CONGRESSO NACIONAL DE TRANSPORTES MARÍTIMOS E CONSTRUÇÃO NAVAL, 14, 1992, Rio Janeiro. Anais. Rio de Janeiro : Sobena, 1992, V.2.
- [5] HIRATA, K.; PADOVEZI, C. D.; Gonçalves, A. L. "Projeto Hidrodinâmico de Automotores" In. : CONGRESSO NACIONAL DE TRANSPORTES MARÍTIMOS E CONSTRUÇÃO NAVAL, 14, 1994, Rio Janeiro. Anais. Rio de Janeiro : Sobena, 1994, V.2.
- [6] IPT/SIDARPA/SINDARMA "Projeto de Embarcações para o Transporte Interior de Passageiros e cargas - Metodologia e Critérios - Manual do Usuário" - IPT. 1989.
- [7] RIVA, J. C. T. - "Sobrelargura de Canais". Tese de doutorado. 1982.
- [8] ROORDA, E. M. N. - "Small Seagoing Craft and Vessels for Inland Navigation"- Tech. Publ. Company - Holanda - 1957.
- [9] PNA - Principles of Naval Architecture, Volume I, II, III 1988.
- [10] LATORRE, R., DUNOW, H.H. "Improvement of River Towboat Propulsion: Translations of selected German and Russian Technical Articles". University of Michigan. DNAME. Report n. 243. Nov/81.
- [11] LATORRE, R., "Shallow River Pushboat Preliminary Design". Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, ASCE, Vol.111, July/85. pages 678-692.
- [12] LATORRE, R., LUTHRA, G., TANG, K., "Improvement of Inland Waterway Vessel and Barge Tow Performance: Translations of Selected Chinese, German and Russian Technical Articles". University of Michigan. DNAME. Report n.249. Sept/82.
- [13] BABADOPULOS, J. L. & REIS, M.A.S. "Critérios, normas e recomendações de projeto, construção e operação de embarcações fluviais" 13º Congresso Nacional de Transportes Marítimos e Construção Naval. Rio de Janeiro 1990.
- [14] BAIER, L.A. "American River Towboats". International Shipbuilding Progress, v.6, no. 63, Novembro 1959.
- [15] DANN, A.W.: "Modern Developments in Towboats and Barges for Inland Waterways". Civil Engineering. 1940.
- [16] EDWARDS, V.B., Cole, F. C. "Water Transportation on the Inland Rivers". HISTORICAL TR 1983-1943 SNAME.
- [17] HIRATA, K., LOPEZ, M. R. F., GONÇALVES, A. L., "Dados Preliminares para Projeto de Embarcações de Pequeno Porte" - IPEN 1991.
- [18] PADOVEZI, C. D.: "Características de propulsão e de manobras de comboios fluviais para uma navegação segura". 16º CNTMCN SOBENA, Rio de Janeiro. 1996.
- [19] TACHIBANA, T.; CALTABELOTI, O.; GARCIA, F. C. V. "Integrated System for Inland Transportation in Tietê-Paraná Waterway". The Sixth International Symposium on Practical Ships and Mobile Units, PRADS, September, 1995, Seul, Korea, pages 21501-21513.
- [20] HIRATA, K.; PADOVEZI, C. D.; DARIO, G.B. "Projeto Hidrodinâmico de Empurradores Fluviais". Sobena, Rio de Janeiro, 1996, páginas 107-117.

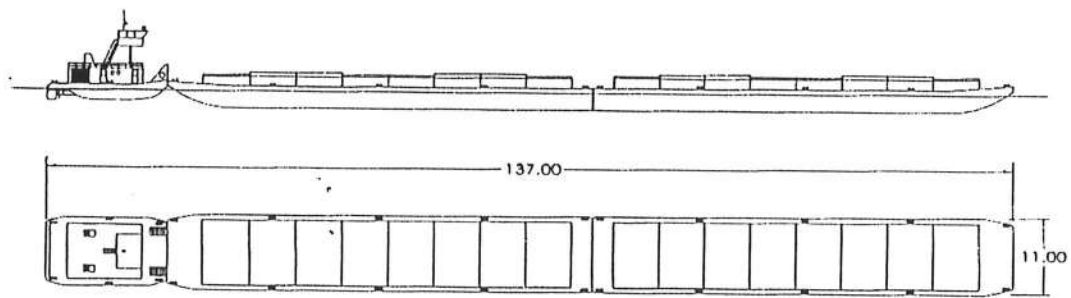


Figura 1 - Comboio Tipo-Tietê [6]

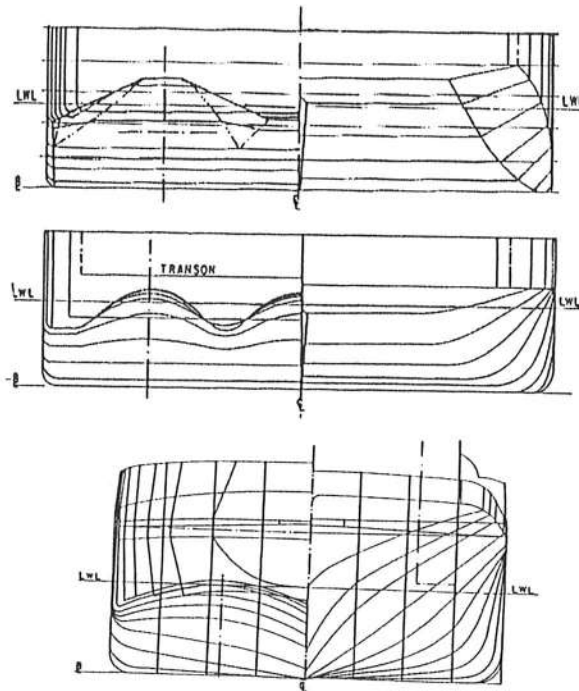


Figura 2 - Empurrador quinado, de formas curvas bi e tri-hélice e com semi-túnel.[11,10]

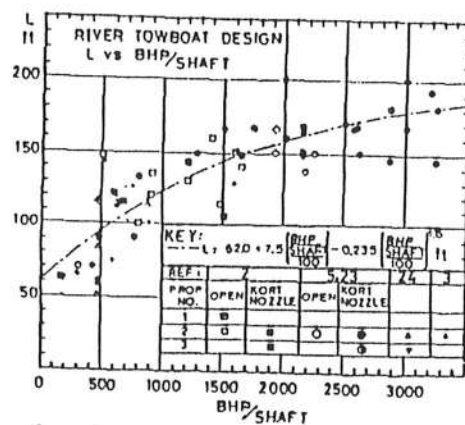


Figura 3 - L x BHP/SHAFT [2]

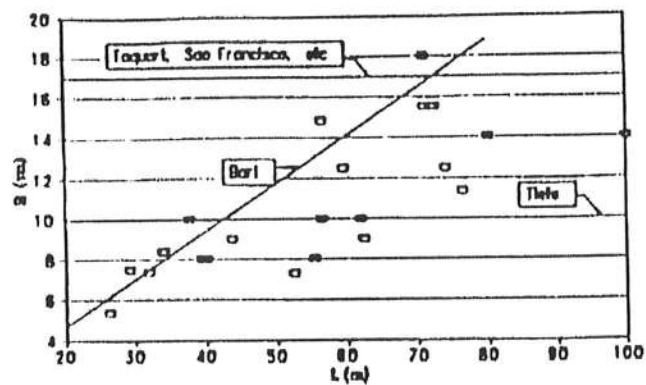


Figura 7 - Boca x Comprimento [4]

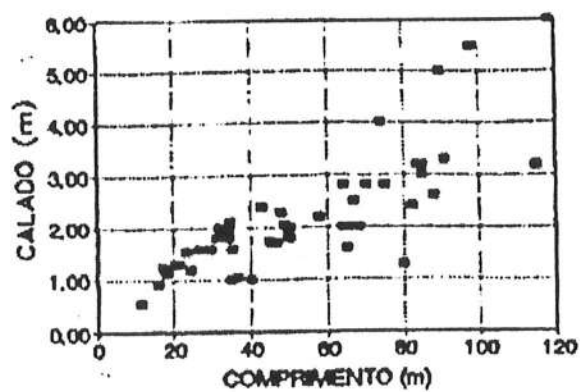


Figura 8 - Calado x Comprimento [5]

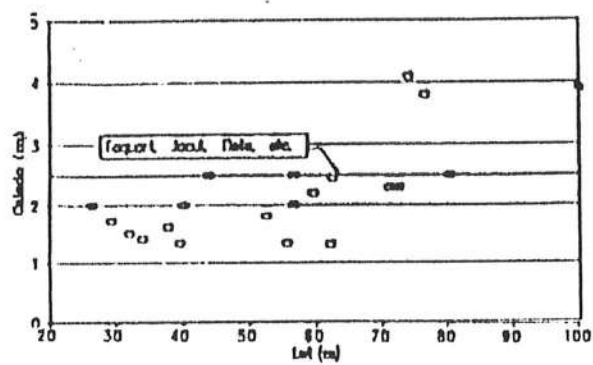


Figura 9 - Calado x Comprimento [4]

00013

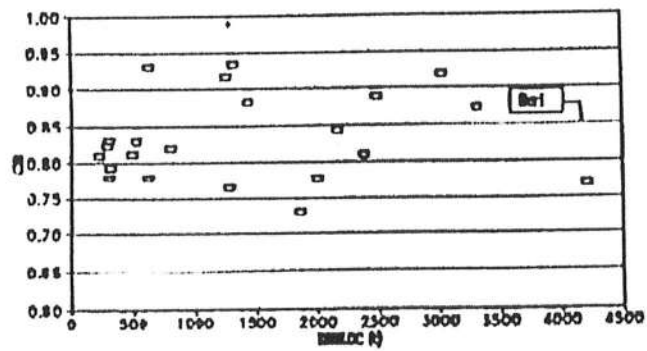


Figura 10 - C_b x Deslocamento [4]

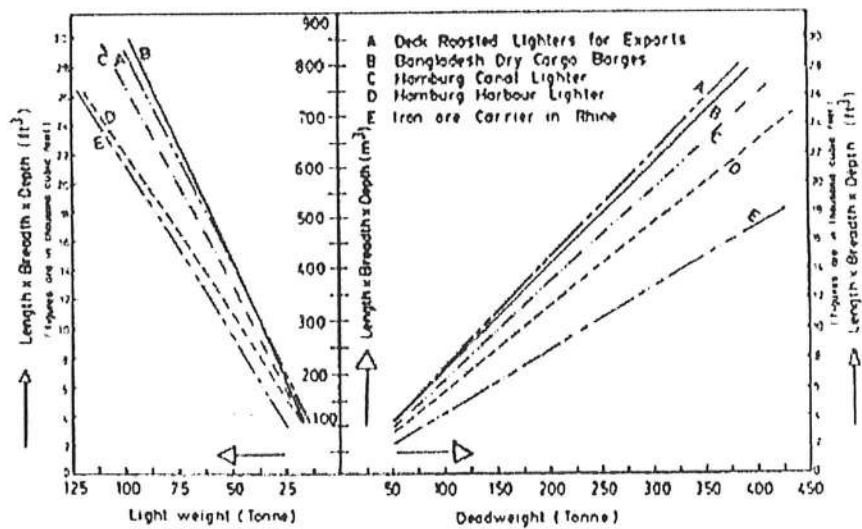


Figura 11 - Dimensões dos Diferentes Tipos de Chatas [1]

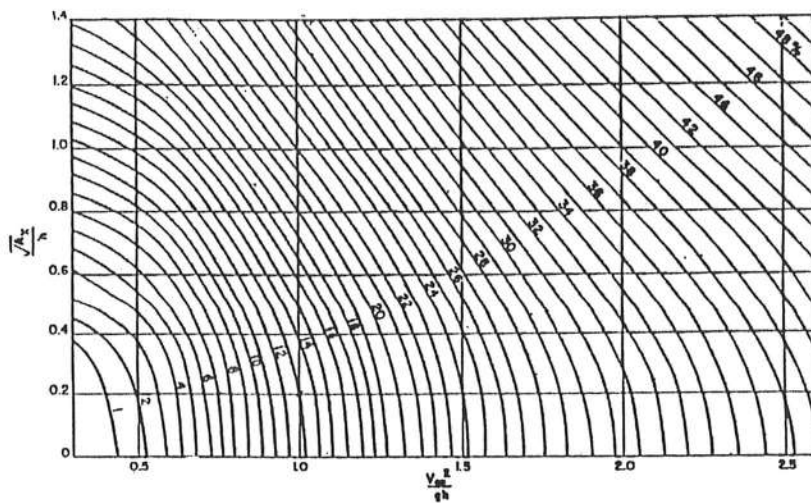


Figura 12 - $\frac{\sqrt{A} \cdot V^2}{gh}$ [1]

High Speed Marine Vehicle Development¹

Dr. R. Latorre Professor
911 Engineering Building
University of New Orleans
New Orleans, LA. 70148
USA

Abstract

Over the past decade, high speed catamarans have displaced conventional passenger and car ferry craft. This paper discusses this as the introduction of advanced concepts in marine vehicles. These developments follow from new technologies and involve hybrid craft designs.

This paper summarizes these designs can be discussed in terms of hydrodynamic and hull structural research and development.

NOMENCLATURE

B	Beam, overall
b	Demihull beam
BHP	Propulsion brake horsepower
C_b	Block Coefficient
C_{pb}	Demihull prismatic coefficient
F_n, F_v	Froude number
g	Acceleration due to gravity
K	Speed coefficient
L	Length
Q	Powering Coefficient
s	Catamaran separation distance
T	Draft
V	Velocity
V_s	Velocity, knots
Δ	Displacement

1. BACKGROUND

Recent, advances in computers, material science, and software, have enabled naval architects to design 35-50 knot catamarans^[1,2,3]. These high speed craft operate at Froude numbers $F_n > 0.35$ as shown in Fig. 1. They can be competitive with helicopters and aircraft over 100 to 1000 km routes. Presently catamarans are being marketed by Europe and the Pacific Rim countries (Japan and Australia). There is also interest in the United States in such high speed marine craft.

¹ IPEN XV COPINAVAL Meeting,
Montevideo, Uruguay 11/97
November, 1997

2. TECHNOLOGY CROSS FOR HIGH PERFORMANCE

Since today's marine technology represents both traditional and new technologies, it became necessary to select a vessel type among the high performance marine vehicles^[1]. These include high speed mono-hulls, hydrofoils, air cushion vehicles, surface effect ships, displacement catamarans, and wing-in-ground-effect (WIG) vehicles. It is important to identify where performance breakthroughs can be realized. This can be best understood from a comparison of two earlier high performance vehicle designs: the China Tea Clipper Ship of the 1850's and the Japanese Zero fighter plane of the 1930's. Both vehicles achieved high performance by the careful merging of materials, structure arrangement, and low drag form around an efficient propulsion system (Table 1). This can be termed the Technology Cross shown in Figure 2. Performance breakthroughs can occur through the integration and development of the technology cross. These four technologies include:

- I. Use of strong lightweight materials.
- II. Rational estimation of loads and design of an optimum structure
- III. Adoption of low drag, seakeeping and maneuverable form.
- IV. Use of efficient propulsion/ maneuvering systems.

2.1 EXAMPLE I: THE CHINA TEA CLIPPER

On March 20th 1864, the British press announced that the clipper ship "Zingra" completed its record voyage of 85 days from Shanghai to Liverpool^[4]. The wooden tea chests, were quickly unloaded and sold. In order to achieve this breakthrough in speed, the designer selected a fine hull form around these tea chests. They also obtained Lloyds Classification Society approval to use wooden

frames with iron braces. The masts were also reinforced with iron and the sails were secured for the long voyage by wire. The Zingra and her sister clipper ships provide us with a clear example of how high performance ships can be designed based on the Technology Cross.

2.2 EXAMPLE II: THE ZERO JAPANESE FIGHTER PLANE

On the second day of the Pacific war, December 8, 1941, a group of bombers escorted by Japanese Zero fighter planes bombed Clark and Iba air bases in the Philippines 865 km from Japanese bases on Taiwan (1700 km round trip). Because 1940 era fighter planes had only a 1500-1600 km range, the US intelligence reported the JNAF Zeros had bombed the Philippines from aircraft carriers.^[5]

The Zero designer Jiro Horikoshi had achieved a performance breakthrough. The Zero had a 3110 Km range flying at 500 km/hr. Horikoshi integrated the cockpit and wing spar, and retractable landing gear. Special attention was given to the surface finish and the use of aerodynamic streamlining. In contrast to the heavier air frame and higher powered engines in US aircraft, the Zero was designed to a 2,250-2,750 kg weight with a relatively small 950 hp engine. By the end of hostilities in 1945, a total of 10,815 Zeros had been produced. Today there remain 30 on exhibit ^[5]. Nevertheless, by 1945 the 900 km/hr jet plane, had already been flight tested.

2.3 EXAMPLE III: THE InCAT

In 1990, the InCat catamaran built in Australia crossed the Atlantic at record speed of 35 knots. This speed record was set by a 78 meter long aluminum displacement hull, powered by twin 4000 hp waterjet units. Similar to the clipper ship design and the Japanese Zero, the InCat performance comes from an emphasis on a lightweight, strong structure coupled with a compact and efficient propulsion system. It is obvious from Table I that each performance improvement occurs when the designer follows the Technology Cross.

3 DEJAVUE: THE CATAMARAN - THE CLIPPER SHIP OF THE 1990's

Over 150 years ago, when the industrial revolution began, engineers replaced wind and muscle power with machine power. Steam engines were built to propel ships and trains. Shipbuilders began to debate the question: "*Why burn expensive fuel to propel the ship instead of using relatively cheap sail (wind) power?*" In the face of steam engines, a group of shipbuilders concentrated on refining traditional shipbuilding technology to build the 16 knot China Tea Clipper. The 16 knot record speed exceeds the recent America's Cup boat speeds of 12-13 knots.

Today we are in the midst of the information revolution. Computers and databases are used to replace humans doing routine mental operations. A new question has emerged among ship designers: "*Why burn expensive fuel to elevate the ship hull above the water, when traditional ships simply float on the surface?*" The answer is to achieve high speed. Nearly three decades ago, high speed passenger hydrofoil vessels began operation on the Soviet Union's rivers and the US Boeing Jetfoil was marketed worldwide. These hydrofoils were followed by a number of passenger carrying air cushion vehicles and surface effect ships.

In spite of these newer vessel concepts, Australian and British shipbuilders continue to deliver high speed aluminum hulled car/passenger displacement catamarans. In a manner of speaking, these catamaran are the clipper ships of the 1990's. The parallel developments of the industrial and information revolutions are illustrated in Figure 3.

3.1 HYDRODYNAMIC DEVELOPMENT OF HIGH SPEED CRAFT

The evolution of high speed craft is a study in marine hydrodynamics. There are four design branches which are shown in Fig. 4 based on the displacement Froude number F_v ^[6].

Branch I - Displacement craft $0 < F_v < 1.5$

Branch II- Air Cushion Vehicles $2.5 < F_v < 6.0$

Branch III- Planing Hull $2.5 < F_v < 6.0$

Branch IV-Hydrofoil Craft $2.5 < F_v < 6.0$

Branch V- WIG-Ecranoplane $8.0 < F_v < 11.0$

The displacement hull speed is limited due to its

large wave resistance at $F_v=1.5$. To overcome this a number of hybrid craft have been introduced a hybrid mode $1.5 < F_v < 2.5$. These craft are illustrated in Fig. 5. This figure shows that the hull block coefficient decreases as the

speed increases. This is a branching where with multi-hull displacement craft the block coefficient based on overall beam becomes small. This dashed line is the high speed catamaran, trimaran and quadmaran.

3.2 RESISTANCE CONSIDERATIONS FOR HIGH SPEED CATAMARAN

A number of researchers^[7,8] have provided guidelines for the Catamaran design. In addition to hull form, they found the resistance is sensitive to the hull separation s to demi-hull beam b , s/b ratio. These guidelines include :

1. The resistance of an unsymmetrical demi-hull is often higher than an equivalent symmetrical hull at $F_n > 0.5$.
2. When the catamaran operates at $F_n > 0.5$, the resistance of an unsymmetric hull becomes lower than an equivalent symmetrical.
3. The wave system interference between two demi-hulls is related to the separation distance s . $s/b = 6$ is considered the minimal separation for non-interference.
4. The theoretical/experimental results show that the Froude number at which there is a positive demi-hull interface is given by,

$$F_{rn} = 0.55 + 0.042 \left[\frac{\Delta}{(0.1L)^4} \right]^2 \left[\frac{0.166}{\left(\frac{s}{b} - 4 \right)^{7/4}} + 1 \right]^2 \quad (1)$$

5. At higher Froude numbers, there is a flow blockage between the catamaran hulls. Experiments have shown this occurs at,

$$F_{rb} = \sqrt{\frac{10}{\frac{L}{b} \left(\frac{s}{s - c_{pb}} \right)^2 - 1}} \quad (2)$$

The results for a number of high speed catamarans are surveyed in Figure 9. This figure shows that these catamarans operate at design Froude number Fr ,

$$F_{ro} < F_r < F_{rb} \quad (3)$$

Typically $\frac{F_r}{F_{ro}}$ is in the range of

$$1.1 < \frac{F_r}{F_{ro}} < 1.4.$$

The hydraulic jump occurs in the range of $2.0 < F_n < 2.5$ ^[3].

Returning to Fig. 5 for $F_v > 1.5$, the other approach is to adopt designs based on hybrid craft such as:

1. Semi-displacement craft
2. Semi-submerged craft
3. Air cavity craft

Then at $F_v > 2.5$, dynamic lift supported craft are typically the preferred design.

4.0 ACHIEVEMENT OF HIGH SPEED CRAFT

There is a strong interest in 40-50 knot marine transport craft. Table 2 summaries several recent developments^[9-11]. In each case the requirements for a high speed craft is being fulfilled by a hybrid craft such as an SES or Hydrofoil SWATH. The consequence of this development is the improvement of the design of high speed craft. It is useful to compare the state of the art in 1970 and 1995. Figure 6 shows the results of a survey of high speed craft which are plotted on the basis of:

Power Coefficient:

$$Q = \frac{0.148 \text{ BHP}}{\Delta V_s} \quad (4)$$

Speed Coefficient:

$$K = \frac{0.583 V_s}{\Delta^{1/6}} \quad (5)$$

The performance line of 1970 has been broken by the current designs as shown in Fig. 6. The lower 1995 performance line shows a significant improvement in the power coefficient and the speed coefficient. This reflects improvements in both hydrodynamics and the use of lightweight, high strength hull structures.

5. LIGHTWEIGHT STRUCTURE CONSIDERATIONS

In addition to the hydrodynamics it is necessary to return to the technology cross and consider material and structure design. This has resulted in the development of a lightweight ship structure test rig and an integrated finite element analysis approach^[12].

The structure test rig is 6.1m long x 3.05m wide x 3.05 high with six 222 KN (50,000 lb) force actuators. The test frame is shown in Fig. 7. It was used in the tests of a 4.6mx1.52m (15x5 ft) aluminum hull test panel for a 40-45 kt 40m craft. The test results were validated the finite element analysis. By optimization of the panel design, selecting a thinner plate and adding an additional longitudinal, a weight reduction of 15% was achieved^[12]. This reduction in structure weight offsets the increased production man-hours resulting in a net savings.

This test facility is now part of a number of current and future lightweight hull structural tests.

6. CONCLUDING REMARKS

While there are a number of advanced concepts in marine vehicles, the present work shows that they can be viewed as designs which are attractive in different speed ranges. This view is the basis for the following conclusions:

1. There is a parallel traditional/new technology available for high speed craft.
2. Performance breakthroughs occur from the integration and development of the technology cross quadrants.
3. The resistance of an unsymmetrical demi-hull is often higher than an equivalent symmetrical hull at $F_n < 0.5$.
4. When the catamaran operates at $F_n > 0.5$, the resistance of an unsymmetric hull becomes lower than an equivalent symmetrical hull.
5. The wave system interference between two hulls is related to the separation distance s . $s/b = 6$ is considered the minimal separation for non-interference.
6. The theoretical/experimental results show that the design should operate at a Froude number F_{na} where there is a positive demi-hull interface.
7. At a higher Froude number F_{nb} , there is a flow blockage between the catamaran hulls. This causes a hydraulic jump which significantly increases the and the resistance increases significantly.
8. For economical operation, the catamaran should operate at design Froude number F_n ,
 $F_{no} < F_n < F_{nb}$
9. The achievement of high performance also requires attention be given to the design of lightweight, high strength hull structure using both Finite Element Analysis and Structural tests.

10. The introduction of the 6.1x3.05x3.05 structural test frame has created an important tool for the development of lightweight hull structures.

7. REFERENCES

- 1 Casanova, R., Latorre, R., "The Achievement of High Performance in Marine Vehicles over the Period of 1970-1990", *Proceedings Intersociety High Performance Marine Vehicles Conference*, ASNE Arlington, 1992 Paper o/a 61-66.
- 2 Trillo, R.L., "High Speed over Water, Ideas from the Past, the Present and for the Future", *First International Conference on Fast Sea Transportation*, Fast 91, Vol. 1
- 3 Latorre, R., Vasconcellos, J.M., "Database Development for High Speed Catamarans," *Proceedings RINA Symposium High Speed Vessels for Transport and Defense* London paper 1, 1995.
- 4 MacGregor D.R., "The Tea Clippers, Their Historical and Development 1833-1875", *Naval Institute Press*, Annapolis, 1983.
- 5 Mikes, Robert C., "Zero, Combat and Development History of Japan's Legendary Mitsubishi AGM Zero", *Motor books, International*, Osceda, WI, 1994.
- 6 Basin, M.A., Latorre, R., "Development of a High Speed Craft with Aero-Hydrodynamic Support," *Proceedings FAST '97 Sydney* July 1997.
- 7 A. Millward, "The Effect of Hull Separation and Restricted Water Depth on Catamaran Resistance," *Royal Institution of Naval Architects*, 1992, pp. 341-349.
- 8 Wang Chengyi, "Resistance Characteristic of High-Speed Catamaran" *Trans. Chinese SNAME*, 1992, Vol. 35, pp. 145-170.
- 9 "Techno-Superliner", *Techno-Marine Bulletin* SNAJ No. 785 Nov. 1994, pp. 6-12
- 10 Bosworth, M., Black, S. Meyer J.R., "Well Deployable Craft, *Naval Engineer Journal*, Jan 1994 pp.108-115
- 11 "Surface Effect Ship Wins High Speed Ferry Competition," *MARIN News*, Nov. 1994
- 12 Latorre, R., Herrington, P., "Development of a Production Optimization Program for Design and Manufacture of Light Weight/ High Strength Hull for the Next Generation of High Speed Craft," *Proc. 1997 Ship Prod. Symposium*, New Orleans. April, 1997.

Table 2 - Recent examples for 40-50 knot hydrofoil

No.	Project	Sponsor	Vessel	Type	Payload ton	Range naut mi.	Speed kts	Sea state max.	LBT m	Ref.
I-a	Techno Superliner	JAPAN	Air Cushion Catamaran	Hybrid (Hisho)	1000	500	50	6	127x27x1.4	[9]
I-b	Techno Superliner	JAPAN	Hydrofoil SWATH	Hybrid (Hayate)	1000	500	50	6	72x37x5.6	[9]
II-a	MDV Hull Deployable	US Navy	SES	Hybrid	-	2000	45-50	5	53x14x0.6	[10]
II-b	MDV Hull Deployable	US Navy		Hybrid	-	2000	45-50	5	39x14x2.7	[10]
III	FAST	MARIN	SES	Hybrid	2000 pass. 250 cars	350	42	-	-	[11]

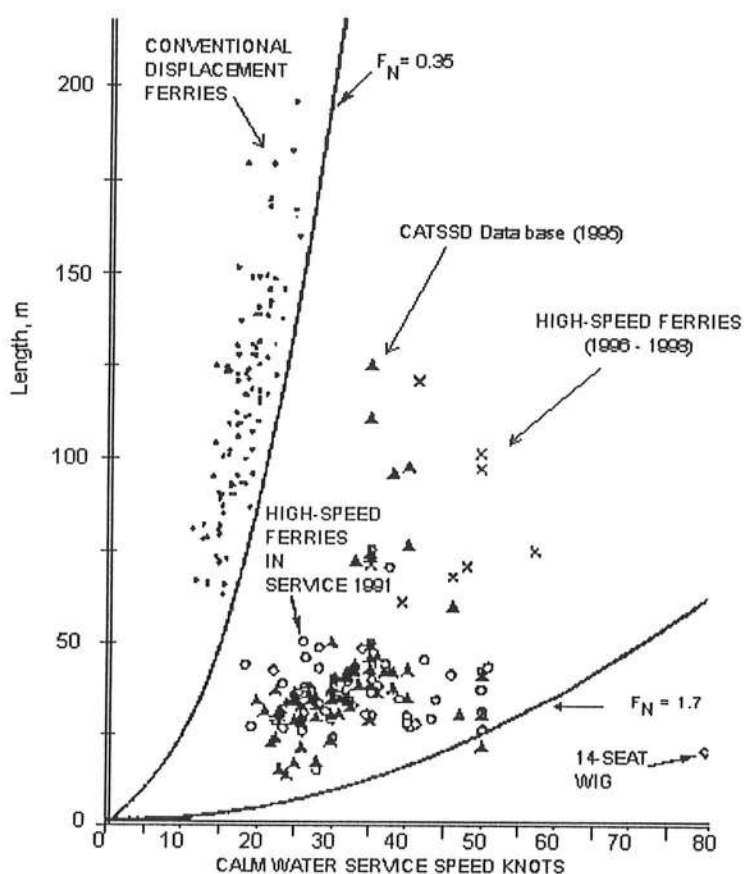


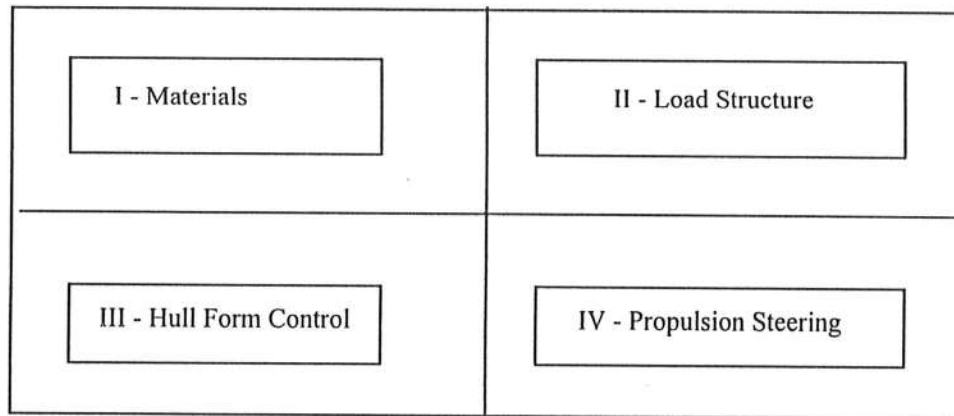
Fig. 1
Comparison of ship length versus speed for passenger ferries 1991 - 1998³⁾

IPRI XV COMNAVAL Meeting
Montevideo - Uruguay
11 - 14 Nov. 1997

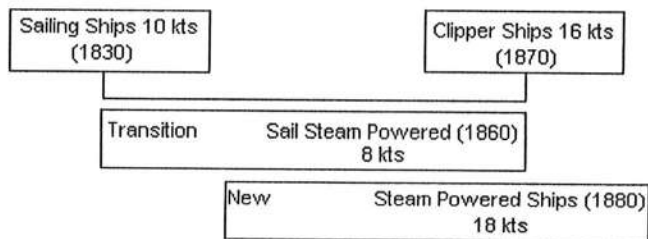
Table 1 - Comparison of High Performance Vehicle Designs^[3]

	Clipper Ship	Japanese Zero	Passenger Catamaran
Item	Sailing Ship (1850)	Fighter Plane (1937)	Ferry Craft (1988)
Goals	Speed Endurance Economy	Speed Maneuverability Range	Speed Seakeeping Economical Operation.
Constraints	Wood	Small Engine	Displacement hull
Focus	Hull Strength Cost	Exceed State of Art	Weight/Propulsion Cost
Strategy	Utility Design	Clean Design with small engine	Optimum Cat Design
Predecessor	Sailing Ships (1850)	Type 96 "Clude" fighter (1930)	Catamarans (1970)
I. Material	Composite wood / Iron	Duralumin (7075 Al)	Aluminum
Note	Weight/Strength Improved	30% Higher Tensile 80% Higher Yield	Extrusions to reduce welds
II. Loads Estimate	Classification Society	Rational Design	Classification Society
Structure		Navy Spees	
Note	Longitudinal /Frame	Integral Wing Cockpit	Strength Deck Separate House
III. Form	Slender	Streamline	Stream line/Slender
Note	Special Bow	Enclosed Cockpit Retractable Landing Gear	Good Seakeeping Form
IV. Propulsion	Large Sail Plan	Special Wing Section Special Propeller	Steering Waterjet
Notes	Wires Used for Sail Rigging	Air Cooled Lightweight Engine	Lightweight High Speed Diesel Engines

Fig. 2
Technology cross



I. Industrial Revolution of 1850's



II. Information Revolution of 1990's

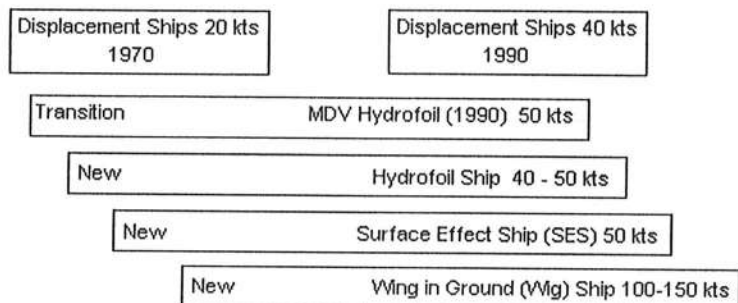


Fig. 3
Parallel technology development Industrial/Information Revolutions^[3]

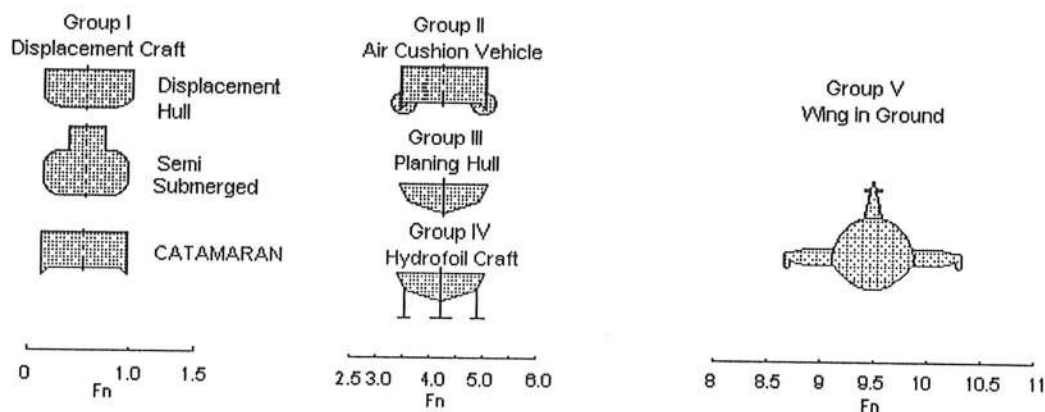


Fig. 4 High Speed Marine Vehicle Design and Froude Number^[6]

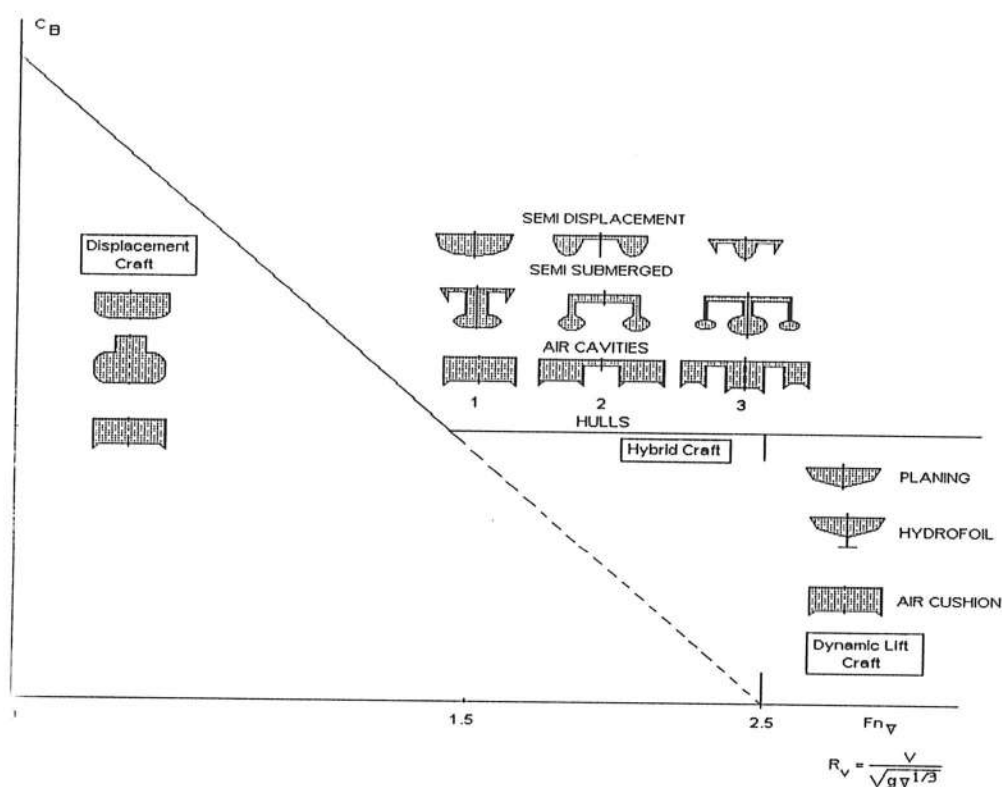


Fig. 5 Development of Hybrid Craft^[6]

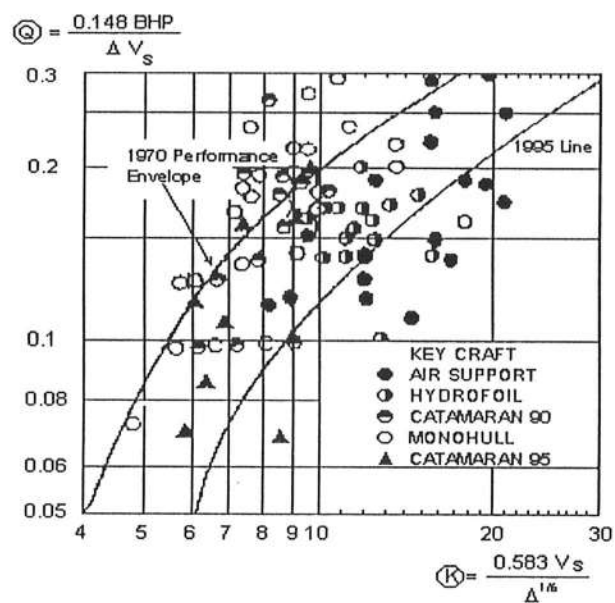


Fig. 6 Comparison of 1970 and 1995 High Speed Craft Performance^[3]

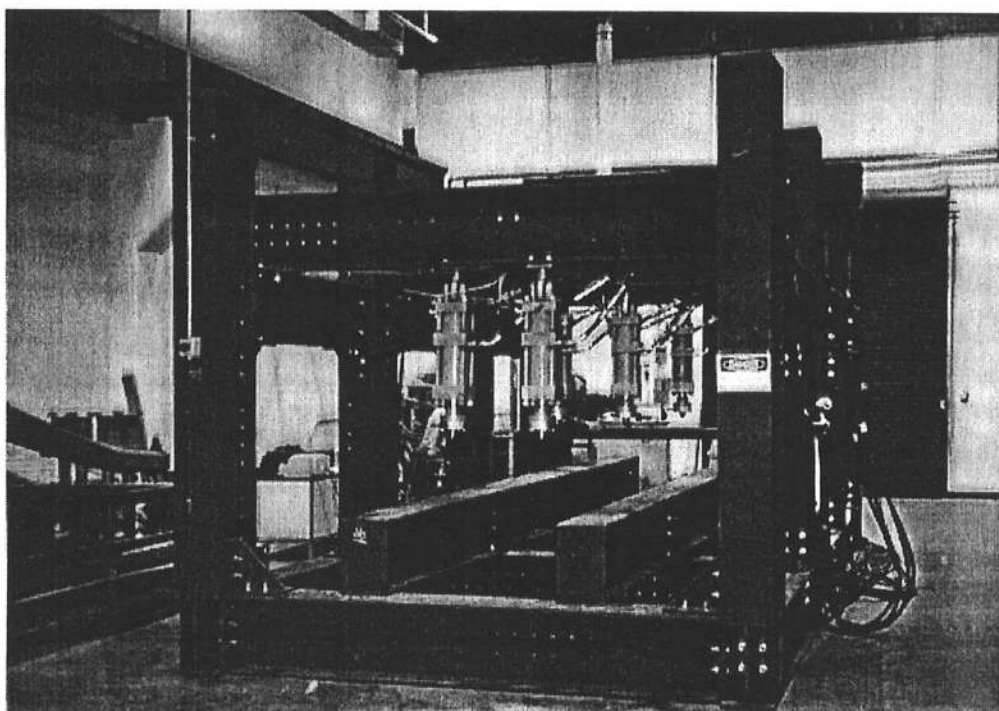


Fig 7. 6.1x3.05x3.05 m UNO Structural Test Frame