

OTIMIZAÇÃO DE COMBOIO INTEGRADO DE CHATAS
PARA TRANSPORTE DE BAUXITA NA AMAZÔNIA

José Antonio Cristovão Balau, Eng^o Naval, Mestre*

R E S U M O

Neste trabalho propõe-se um modelo geral para otimização de comboios integrados de chatas e a sua aplicação no dimensionamento do sistema de transporte fluvial de bauxita na Amazônia.

O modelo consiste do equacionamento do problema de transporte, e da determinação da solução ótima que atende ao critério de "mínimo custo de transporte", com emprego do método de otimização de Hooke-Jeeves associado à função de penalidade.

O modelo permite tanto a otimização das características do comboio em função das restrições da hidrovia, como a otimização conjunta embarcação-hidrovia sempre que houver interesse em investir na hidrovia em benefício da redução do custo de transporte.

Para o equacionamento do modelo foram desenvolvidas formulações analíticas para cálculo de EHP de comboios integrados, peso de aço de chatas de duplo casco e distância percorrida pelo comboio numa operação de parada brusca.

A B S T R A C T

A general model for the optimization of integrated barge convoys and its application on the study of a bauxite inland transportation system for the Amazon region are presented.

The model consists in the resolution of the transportation problem and the determination of the optimum solution, according to the transportation minimum cost criterion, using the Hook-Jeeves optimization method associated with a penalty function.

The model allows the optimization of the barge convoy characteristics considering the waterway restrictions, as well as the simultaneous convoy-waterway optimization whenever it is desired to invest in the waterway to reduce the transportation cost.

Analytical formulations were developed in order to permit the calculation of the EHP of integrated barge convoys, the steel weight of double-hull barges and the distance along the crash-stop path of the convoy.

*Chefe do Agrupamento de Projeto Naval-Divisão de Engenharia Naval e Oceânica
IPT - Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S/A.

NOMENCLATURA

B	: boca total do comboio (m)	NCL	: número de chatas no sentido longitudinal do comboio
b	: largura requerida do canal	NCT	: número de chatas no sentido transversal do comboio
BC	: boca de uma chata do comboio (m)	NVR	: número de viagens redondas/ano de um comboio
BHP	: potência absorvida pelos hélices (CV)	R	: raio de curvatura do canal
B _{máx}	: boca máxima do comboio permitida pela hidrovia (m)	S _s	: distância percorrida pelo comboio até parada total em manobra de parada brusca
C	: custo total anual com a frota	T _e	: taxa horária de embarque da bauxita (t/h)
c	: custo de transporte (Cr\$/t)	TE	: tempo de embarque
CA	: custo anual com administração da frota	TEE	: tempo de espera na fila do terminal de embarque
CAT	: custo anual com tripulação	T _d	: taxa horária de desembarque de bauxita (t/h)
C _b	: coeficiente de bloco do comboio	TED	: tempo de espera na fila do terminal de desembarque
CC	: custo anual com óleo combustível e óleo lubrificante da frota	TPB	: tonelagem de porte bruto do comboio (t)
CI	: custo anual com amortização do investimento	TVR	: tempo de viagem redonda (h)
CIH	: custo de preparação da hidrovia	V	: velocidade do comboio (nós; 1 nó = 1,853 km/h)
CR	: custo anual com reparos e docagens periódicas	W _c	: largura do canal
D	: pontal da chata (m)		
EHP	: potência efetiva de reboque		
H	: calado do comboio (m)		
H _{máx}	: calado máximo do comboio permitido pela hidrovia (m)		
I	: investimento total na frota		
IHP	: potência total instalada (CV)		
L	: comprimento total do comboio		
LC	: comprimento de uma chata do comboio (m)		
L _e	: comprimento do corpo de entrada do comboio		
L _{máx}	: comprimento máximo do comboio pela hidrovia		
L _{WL}	: comprimento na linha d'água do comboio		
NE	: número de empurradores da frota		

1. INTRODUÇÃO

A tomada de decisão de um armador quanto às características da frota necessária para atender a uma determinada demanda de carga é normalmente feita com base numa análise comparativa do desempenho econômico entre alternativas possíveis.

É comum neste tipo de análise econômica comparar-se alternativas envolvendo embarcações já existentes e disponíveis no mercado. Este procedimento, apesar de válido em casos particulares, em geral não permite a obtenção da melhor solução pelo fato de deixar de considerar novas configurações das embarcações, determinadas por condicionantes específicas do novo problema de transporte.

O transporte fluvial de bauxita na região Amazônica é um caso típico de problema de transporte cujo equacionamento exige a proposição de embarcações fluviais com características bastante diversas das que hoje operam na região. As características da hidrovia são tão particulares que provavelmente nem mesmo a adoção de soluções empregadas em outros países permite o máximo rendimento do conjunto embarcação-hidrovia.

Apresenta-se para o problema de transporte fluvial de bauxita na Amazonia, a aplicação de um método de determinação da solução ótima que possibilita a análise de uma ampla faixa de variação dos parâmetros básicos que definem o comboio fluvial. O método permite ainda uma análise conjunta embarcação-hidrovia, ou seja embarcação ótima em função das características naturais da hidrovia em corrente livre, ou em função dos custos de implantação de uma hidrovia canalizada. No primeiro caso considera-se apenas o investimento nas embarcações e a solução final corresponde a alternativa que minimiza os custos da embarcação. No segundo caso, a solução final corresponde a alternativa de mínimo custo global embarcação-hidrovia.

A concepção básica da embarcação é a de comboio integrado de chatas, cujas características principais são determinadas pelo método de busca da solução ótima. A concepção do comboio integrado de chatas para transporte fluvial de quantidades bem determinadas de carga homogênea entre dois portos pode ser considerada o estágio mais recente do processo de desenvolvimento do transporte fluvial, cujo início remonta à Idade Média com a utilização de sirga com tração animal para rebocar batelões ao longo de rios e canais.

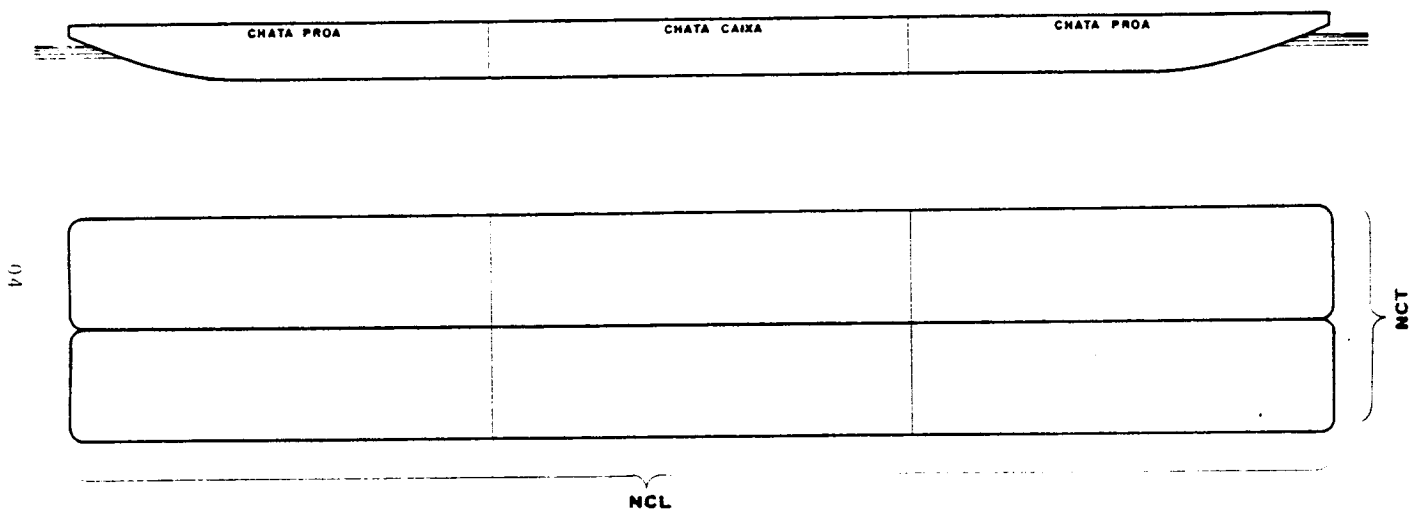


Figura 1: Exemplo de Comboio Integrado 3x2, Formado por 4 Chatas Tipo "Proa" e 2 Chatas Tipo "Caixa"

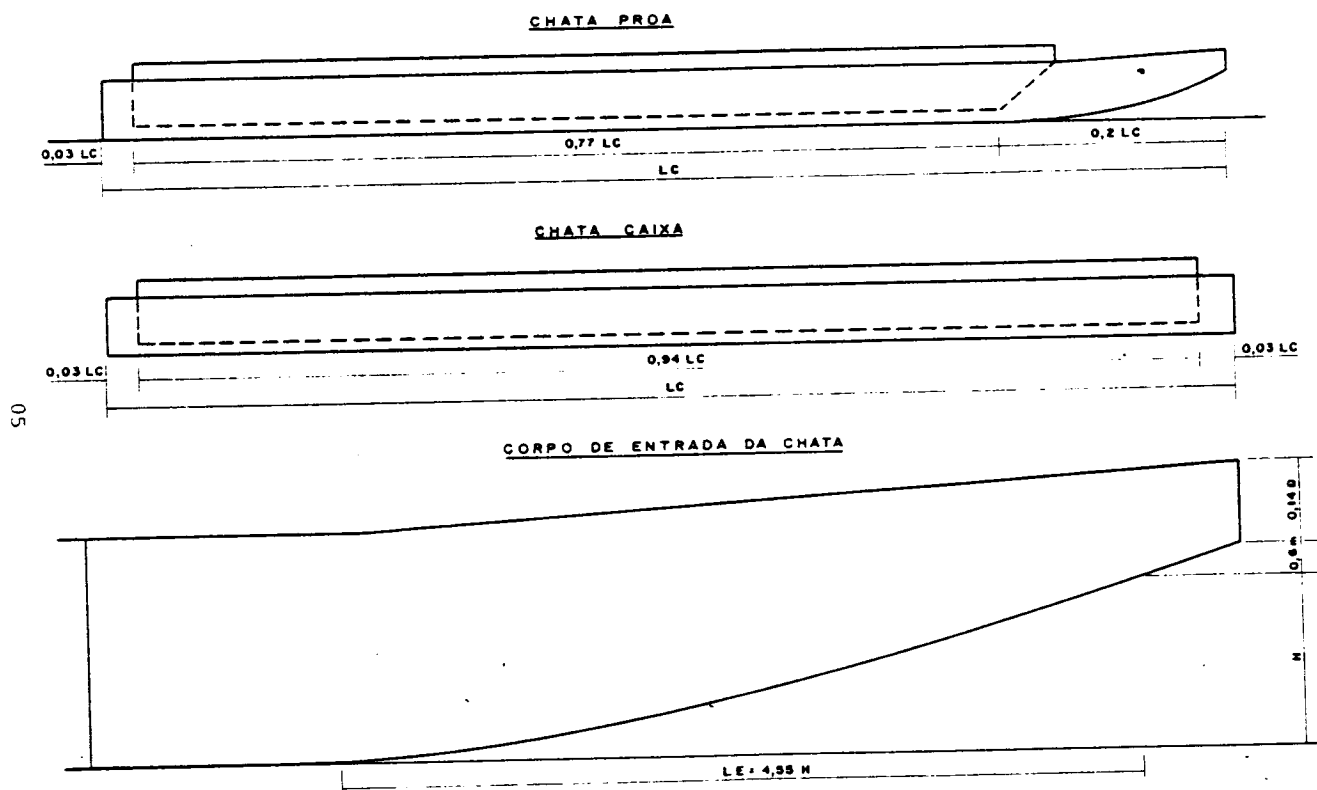


Figura 2 : Configuração Geométrica das Chatas do Comboio Integrado.

3. - DESCRIÇÃO DO PROBLEMA DE TRANSPORTE EM ESTUDO

O problema de transporte fluvial analisado neste trabalho tem as seguintes características:

3.1. Demanda

Está prevista uma demanda anual de 2 milhões de toneladas de bauxita entre Porto Trombetas, às margens do rio de mesmo nome e o porto de Vila do Conde, localizado no município de Barcarena, às margens da Baía de Marajó a cerca de 56 km de Belém do Pará. A bauxita destina-se ao complexo Albrás/Alunorte localizado junto à área portuária de Vila do Conde.

A bauxita a ser transportada é úmida com densidade de média de 1,3 t/m³, que ao ser armazenada a granel apresenta um ângulo de repouso de 39°.

3.2. Terminais

O terminal de embarque, em Porto Trombetas, está dotado de carregador linear deslizante com capacidade efetiva de 1890 t/h. Por este terminal serão embarcados 5,35 milhões de toneladas anuais de bauxita, das quais 2,0 milhões destinadas à Vila do Conde e 3,35 milhões destinadas à exportação.

O terminal de desembarque de Vila do Conde será aparelhado com 2 guindastes de caçambas totalizando uma capacidade efetiva de 1154 t/h. Além dos 2 milhões de toneladas de bauxita de Porto Trombetas, serão desembarcadas, neste terminal, 2,4 milhões de toneladas de bauxita provenientes de outros locais.

3.3. Rotas

O percurso fluvial entre Porto Trombetas e Vila do Conde desenvolve-se pelos rios Trombetas, Amazonas, canais

e furos da Ilha de Marajó e finalmente rio Pará e Baía de Marajó (figura 3). Para contorno da Ilha de Marajó existem no momento duas alternativas: furo do Boiuçu e furo do Itaquara. Estas duas rotas têm características bem distintas. A rota do Boiuçu é menos extensa, possui canais navegáveis mais largos e menos sinuosos, sendo no entanto restritiva quanto à profundidade. A rota do Itaquara oferece como vantagem maiores profundidades.

Existe ainda a possibilidade da abertura de um canal interligando o Lago Caxuanã à Fôz do Rio Xingu, encurtando a distância da ligação Rio Amazonas-Rio Pará.

Para este estudo considerou-se possível esta ligação, através da abertura de um canal com cerca de 50 quilômetros de extensão, unindo os rios Ipixuna e Caxuanã. Segundo a referência 06 o material a ser removido é constituído de sedimentos argilosos e areno-argilosos, o que facilita a abertura do canal.

A figura 3 e as tabelas 1 a 3 resumem as informações básicas das três rotas alternativas.

Tabela 1 - Distâncias Navegáveis pelas Rotas Alternativas (Km)

Rios	R O T A S		
	Boiuçu	Itaquara	Caxuanã
Trombetas	109	109	109
Amazonas	511	511	387
Canal do Vieira	61	61	-
Furos e estreitos	158	232	203
Pará	189	189	189
TOTAL	1028	1102	888

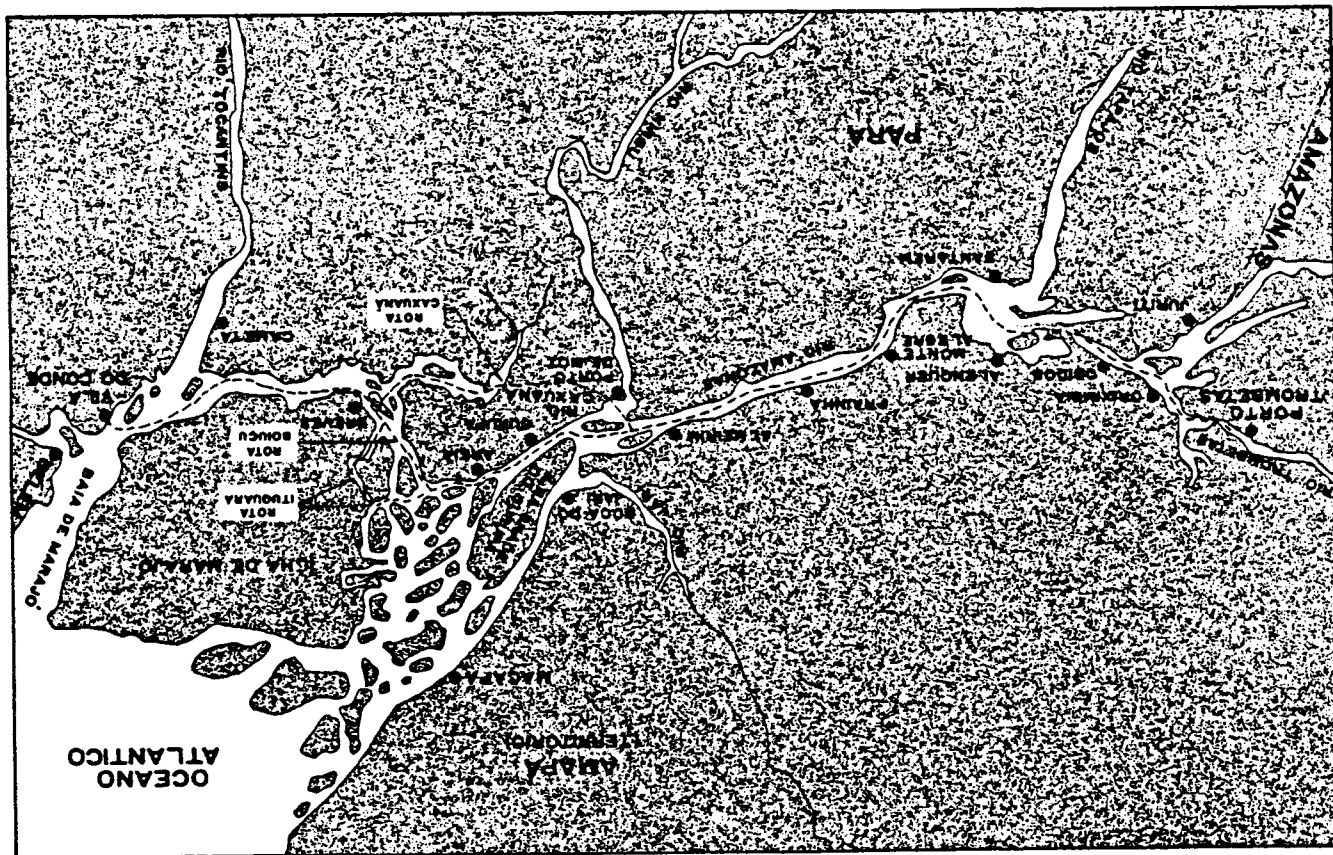
Tabela 2 - Porcentagem de Comprimento do Canal com Determinada Profundidade

Rio	profundidade(m)				
	5 - 10	10 - 15	15 - 20	20 -	
Trombetas	-	14,6%	35,4%	50,0%	
Amazonas	-	-	6,0%	94,0%	
Boiuçú	9,8%	64,3%	13,5%	12,4%	
Ituquara	2,5%	54,2%	23,5%	19,8%	
Pará	-	19,9%	35,4%	44,7%	

Tabela 3 - Limitações das Rotas Alternativas
(em metros)

Rota	calado máximo	largura mínima	raio de curvatura mínimo
Boiuçú	5,0	60	1000
Ituquara	7,0	100	600
Caxuanã	*	60	1000

* a ser determinado na otimização do conjunto embarcação-canal.



4. MODELO MATEMÁTICO PROPOSTO PARA DETERMINAÇÃO DA SOLUÇÃO ÓTIMA DO SISTEMA DE TRANSPORTE

A solução ótima para o sistema de transporte de bauxita entre Porto Trombetas e Vila do Conde, deve ser aquela que entre as possíveis alternativas de embarcações e rotas vier a apresentar o mínimo custo de transporte.

Esta solução ótima é obtida pela aplicação de técnica de otimização na função de custo de transporte, sujeita a restrições impostas pela hidrovia e por critérios intrínsecos de engenharia e construção naval.

O desenvolvimento do modelo matemático do sistema de transporte é apresentado inicialmente para hidrovia em corrente livre e complementado posteriormente para hidrovias canalizadas. No primeiro caso admite-se que não existem investimentos na via, ao passo que no segundo caso eles existem e incidem no custo de transporte.

4.1. Desenvolvimento do Modelo Matemático para o Sistema de Transporte Utilizando Comboios Integrados de Chatas

4.1.1. Relações Funcionais Básicas

Para o desenvolvimento do modelo matemático proposto serão definidas inicialmente algumas relações funcionais básicas do sistema, para posteriormente determinar a função de custo de transporte.

4.1.1.1. Potência do Empurrador

a) Potência Requerida para Propulsão

Conforme detalhado na referência 1 a potência requerida pelo sistema propulsivo (BHP) para o comboio operar

com uma determinada velocidade V , é:

$$BHP = \frac{EHP}{cp}$$

sendo:

$$\begin{aligned} EHP &= F_s (K_1 + (NCL - 1) \cdot K_2) \\ K &= 1,872 \cdot 10^{-3} \cdot V^{2,90} \cdot (B/H)^{0,34} \\ K_1 &= K \cdot V^{0,63} \cdot (L/B)^{-0,06} \\ K_2 &= 0,05 \cdot K \cdot V_1^{0,63} \cdot (2LC/B)^{-0,06} \\ B &= NCT \cdot BC \\ L &= NCL \cdot LC \\ V &= NCL \cdot LC \cdot H \cdot NCT \cdot BC - 4,55 \cdot H^2 \cdot NCT \cdot BC \\ &\quad (\text{ver figuras 1 e 2}) \\ V_1 &= 2 \cdot LC \cdot H \cdot NCT \cdot BC - 4,55 \cdot H^2 \cdot NCT \cdot BC \\ cp &: \text{coeficiente propulsivo do empurrador} \\ F_s &: \text{fator de serviço} \end{aligned}$$

Neste estudo adotou-se $cp = 0,40$ e $F_s = 1,3$ e considerou-se ainda que a resistência do empurrador é insignificante em relação a resistência do comboio.

A potência total instalada no empurrador, leva em conta as folgas habituais de projeto e o fato de o hélice do empurrador ser usualmente projetado para a condição de tração estática "bollard-pull".

Considerando-se que a potência absorvida pelo hélice na velocidade V do comboio é cerca de 85% da potência absorvida na condição de tração estática (máxima potência absorvida pelo hélice) e ainda que nesta condição o hélice absorve 80% da potência nominal do motor (perdas devido a temperatura do ar, altitude, etc.), resulta:

$$IHP \geq \frac{BHP}{0,85 \cdot 0,80} \geq 1,47 \cdot BHP \quad (a)$$

O dimensionamento da potência instalada de comboios integrados de grande porte, nem sempre pode ser feita apenas em função da potência requerida para navegar a uma determinada velocidade V . É determinante também a potência necessária para limitar a distância percorrida numa operação de parada brusca de emergência, quando a embarcação navega a essa mesma velocidade V .

b) Potência Requerida para Parada Brusca do Comboio

A máxima distância admissível a ser percorrida pelo comboio numa operação de parada de emergência deve ser determinada pela máxima distância de visada que a hidrovia permite. Assim o comboio poderá trafegar em toda a hidrovia na velocidade de regime, porque sempre haverá espaço suficiente para parada caso o piloto observe algo que obstrua a trajetória da embarcação.

Do exame das rotas alternativas e de entrevistas com práticos da região decidiu-se fixar a seguinte posição:

$$\frac{S_s}{L_{\max}} \leq 3$$

sendo:

S_s : distância máxima percorrida

$L_{\max}$: máximo comprimento de comboio admitido pela hidrovia

A adoção de $L_{\max}$ como valor de referência é aceitável, uma vez que é determinado pela largura e sinuosidade da hidrovia, elementos determinantes também da distância de visada.

A abordagem da operação da manobra de parada brusca de comboios fluviais foi desenvolvida com base na referência 2.

A equação que traduz o comportamento da embarcação em movimento de parada brusca, considerando trajetória re-

tilínea (o que é possível para embarcação bi-hélice), é dada por (2ª lei de Newton):

$$(M + m) \frac{dv}{dt} = - \left[T \left(1 - \sigma \right) + (R_h + R_e) \right]$$

sendo:

- M - massa do comboio $t_f \cdot m^{-1} \cdot s^2$
- m - massa vertical do comboio = $0,15 \cdot M$
- V - velocidade (m/s)
- T - empuxo do hélice operando a ré, para uma determinada velocidade (V) e rotação (rps), e ar (t).
- σ - coeficiente de redução da força propulsora
- R_h - resistência hidrodinâmica ao avanço da embarcação
- R_e - forças externas (t)

Tem-se a seguinte solução para esta equação diferencial:

$$t_s = \frac{M+m}{KU} \arctan \frac{V_0}{U} + t_r$$

$$S_s = \frac{M+m}{2K} t_h \left[1 + \frac{V_0^2}{U^2} \right] + V_0 \cdot t_r$$

$$K = \frac{R_0}{V_0^2} \quad e \quad U^2 = \frac{(1-\sigma) T}{K}$$

sendo:

t_s - tempo decorrido desde o instante da emissão da ordem "toda a potência a ré", até a parada total da embarcação (s)

S_s - distância percorrida até a parada total

V_0 - velocidade inicial da embarcação (m/s)

t_r - tempo de reversão do motor (s)

R_0^* - resistência a propulsão do comboio quando navegando na velocidade V_0 (t)

T_e - empuxo efetivo do hélice operando a ré, (t).

Da referência 2 o empuxo do hélice à ré é dado

por:

$$T_e = 0,053 \cdot n \left[1,0 + 0,30 \left(A_e/A_o - 0,6 \right) \right] \cdot \left[0,8.D.(IHP/n) \right]^{0,66}$$

sendo:

A_e/A_o - razão de área expandida do hélice

n - número de hélices (e de motores)

IHP - potência total instalada de cada motor

Para hélice Kaplan operando em tubo Kort considere-se um acréscimo no valor de T de 15%.

Impondo-se:

$$n = 2 \text{ (empurrador bi-hélice-Kaplan)}$$

$$A_e/A_o = 0,70$$

$$t_r = 30 \text{ segundos}$$

obtêm-se das expressões anteriores, por análise de regressão a seguinte expressão para cálculo da distância percorrida até parada total da embarcação:*

$$S_s = 2,931 \cdot (IHP)^{0,4181} \cdot (V)^{1,57} \cdot (V)^{0,5749} \quad (4.17)$$

esta expressão é válida para:

$$1.000 < IHP < 8.000 \text{ CV}$$

$$5 < V < 8 \text{ nós}$$

$$5.000 < V < 35.000 \text{ m}^3$$

sendo:

$$S_s \leq 3 \cdot L_{\text{máx}}$$

*tomou-se como base um comboio tipo com L/B = 8,0 e B/H = 10,0 e o diâmetro do hélice dado por D = 1,9 + IHP/5000 (m).

Resultado:

$$IHP \geq (1,024 \cdot L_{\text{máx}})^{-2,392} \cdot V^{3,75} \cdot (V)^{1,375} \quad (b)$$

Observa-se que acima de um determinado valor de V, para um determinado comboio, o IHP é imposto pela expressão b, e abaixo deste valor o IHP é imposto pela expressão a.

4.1.1.2- Capacidade de Carga do Comboio (TPB)

A capacidade de carga do comboio é obtida pela diferença entre o deslocamento total (V) e o deslocamento leve (soma do peso de aço e equipamentos de cada chata do comboio);

$$TPB = V - V_{\text{leve}}$$

Da referência 1 tem-se:

$$TPB = NCT \cdot BC \cdot NCC \cdot LC \cdot H - 4,55 \cdot H^2 \cdot NCT \cdot BC - (NCL \cdot NCT - 2 \cdot NCT) \cdot$$

$$13,30 \cdot \left[\frac{LC \cdot BC \cdot D}{100} \right]^{0,89} - 2 \cdot NCT \cdot 8,05 \cdot \left[\frac{LC \cdot BC \cdot D}{100} \right]^{0,98}$$

4.1.1.3. Tempo de Viagem Redonda (TVR) e Número de Viagens Redondas por Ano (NVR) de Cada Comboio

O tempo de viagem redonda é obtido pela soma de:

- tempo navegando entre Porto Trombetas e Vilado Conde (TN_d);
- tempo navegando entre Vila do Conde e Porto Trombetas (TN_s);
- tempo de espera em fila, no terminal de embarque (TEE);
- tempo de embarque (TE);
- tempo de espera em fila, no terminal de desembarque (TED);
- tempo de desembarque (TD);

Assim, o tempo de viagem redonda é obtido por:

$$TVR = TN + TE + TD + TEE + TED \quad (h)$$

Considerando o ano operacional de 330 dias, o número anual de viagens redondas de cada empurrador é de:

$$NVR = \frac{330 \cdot 24}{TVR} = \frac{7920}{TVR}$$

4.1.1.4. Capacidade Anual de Transporte do Sistema

A capacidade de transporte do sistema ao longo de um ano operacional de 330 dias é de:

$$Q = NE \cdot TPB \cdot \frac{330 \cdot 24}{TVR} = NE \cdot \frac{7920}{TVR} \cdot TPB$$

sendo

NE - número de empurradores da frota

Observar que as variáveis Q e TVR são mutuamente dependentes.

Se substituirmos o valor de TVR tem-se:

$$f(Q) = Q^3 + K_1 Q^2 + K_2 Q + K_3 = 0$$

Sendo K_1 , K_2 e K_3 constantes conhecidas.

Para determinação das raízes do polinômio utilizou-se o método de Newton-Raphson. Por este método tem-se:

$$Q_i + 1 = Q_i - \frac{f(Q_i)}{f'(Q_i)} \quad i = 1, n$$

sendo:

Q_i = demanda anual num determinado passo i do processo de Newton-Raphson

$$Q_i + 1 = \text{idem no passo } i + 1$$

A partir de um valor fixado Q o processo converge até que se obtenha $f(Q) = 0$. Quando isto ocorrer ter-se-á determinado a demanda anual Q, e consequentemente o valor de TVR.

4.1.2. Relações que Expressam Custo de Transporte Fluvial

Os principais itens que compõem o custo total de transporte fluvial (excetuando os custos portuários) são:

- custo de amortização do investimento;
- custo com salários e encargos da tripulação;
- custo com óleo combustível e lubrificante;
- custo com reparos e docagens periódicas das embarcações;
- custo com seguro das embarcações;
- custo com administração da frota.
- custo com a hidrovia;

Esta descrito a seguir a forma como foram determinados os valores anuais destes custos para uma frota de NE comboios.

a) Custo Anual de Amortização do Investimento (CI)

Para determinar-se o custo anual de amortização do investimento, precisa-se inicialmente obter o montante a ser investido na frota.

A referência 1 fornece as seguintes expressões para cálculo do custo de construção do empurrador e chatas:

$$CE^* = 16.513,33 \cdot IHP + 24,77 \cdot 10^6 \quad (Cr\$)$$

$$CCH^* = 32.954,50 \cdot 8,05 \cdot \left[\frac{LC \cdot BC \cdot D}{100} \right]^{0,98} \cdot NCL \cdot NCT \quad (Cr\$)$$

sendo:

CE - custo de construção do empurrador;

IHP - potência total instalada do empurrador (soma da potência dos MCP);

CCH - custo de construção das chatas que compõem um comboio;

O investimento total na frota, é obtido por:

$$I = NE \quad (CE + CCH)$$

Para cálculos da amortização anual do investimento I, foram feitas as seguintes hipóteses:

- O armador remunera o seu investimento à taxa de 10% ao ano;
- O valor residual da embarcação após 20 anos é 5% do valor da mesma quando nova.

resultando:

$$CI = 0,1165 \cdot I \quad (Cr\$)$$

b) Custo com Salários e Encargos da Tripulação (CAT)

Os custos com a tripulação são os seguintes:

- salários e encargos sociais
- alimentação

De acordo com referência 1, para tripulação de 12 homens por empurrador o custo anual com a frota é de:

$$CAT = 3 \ 591 \ 600,00 \cdot NE \quad (Cr\$)$$

* referência maio de 1979 (1,00 US\$ = 24,77 Cr\$)

c) Custo Anual com Óleo Combustível e Lubrificante (CC)

Para cálculo deste custo admitiu-se que em 95% do percurso os MCP* queimem óleo intermediário - IFO 1000 (mistura com 80% de bunker e 20% de diesel) - e nos 5% restantes óleo diesel.

sendo:

COI - custo do óleo intermediário em Cr\$/kg;

COD - custo do óleo diesel em Cr\$/kg.

tem-se da referência (1)

$$CC = NE \cdot NVR \cdot BHP(TN(0,178 \cdot COI + 0,016 \cdot COD) + 0,006 \cdot TP \cdot COD)$$

d) Custo Anual com Reparos e Docagens Periódicas

Este custo anual pode ser estimado em média em:

$$CR = NE \cdot (0,02 \cdot CCH + 0,04 \cdot CE) \quad Cr\$$$

e) Custo Anual com Seguro das Embarcações (CS)

Adotou-se o valor médio de:

$$CS = 0,02 \cdot I$$

f) Custo Anual com Administração da Frota

O custo de administração foi tomado como sendo de aproximadamente 50% dos custos com a tripulação (excetuando-se a alimentação),

g) Custo com Preparação da Hidrovia (CIH)

A rota do Caxuanã exigirá investimentos para abertura do canal de interligação. Conforme já mencionado este canal deverá ter uma extensão de aproximadamente 50 Km.

A figura 4 mostra a configuração geométrica do canal a ser dragado com seção transversal trapezoidal. Para canal artificial com seção indicada foram adotadas as seguintes relações entre dimensões da embarcação e do canal:

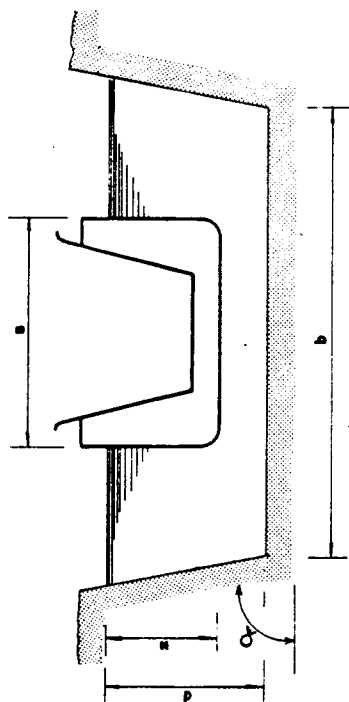
$$\begin{aligned} b^* &= 4,0 \cdot B \\ d &= H + 1,0m \end{aligned}$$

Da figura 4 tem-se:

$$S_s = (b + d/\text{tg}\alpha) \cdot d \quad (\text{área da seção transversal do canal})$$

$$S_c = (b + d + d^2/0,33)$$

Substituindo b e d pelos valores acima tem-se:



$$\alpha = 16,9^\circ$$

Figura 4. Seção Transversal do Canal com Cruzamento

$$\begin{aligned} b &= 4,0 \cdot B \\ d &= H + 1,0m \end{aligned}$$

* $b = 2 \cdot B$ para canal sem cruzamento de embarcações

$$S_c = (H + 1,0) (4,0 \cdot B + \frac{(H + 1,0)^2}{0,33}) \text{ m}^2$$

O volume de material a ser dragado* é:

$$VD = S_c \cdot E_c$$

E_c : extensão do canal (m)

O investimento necessário para abertura do canal é dada por:

$$IC = CUD \cdot S_c \cdot E_c$$

CUD: Custo unitário de dragagem (Cr\$/m³)

O custo anual do investimento é dado por:

$$CIH = \left[\frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \right] \cdot I_c$$

$$CIH = \left[\frac{i}{1 - \frac{1}{(1+i)^n}} \right] \cdot I_c$$

i - taxa de remuneração anual do investimento
 n - vida útil do canal em anos

Considerando que um canal desta natureza tem uma vida útil muito longa, a medida que n tende a ∞ , tem-se da expressão:

$$CIH = i \cdot I_c$$

A abertura deste canal virá beneficiar toda a navegação da região e não somente os comboios que operarão no

* canal retilíneo

transporte de bauxita. Como a bauxita deverá representar cerca de 50% do fluxo de carga pelo canal, considera-se que sobre esta carga recaia o onus de 50% do custo do investimento necessário para a execução do canal.

Admitindo uma taxa de remuneração do investimento de 10% ao ano, resulta:

$$CIH = 0,05 \cdot CUD \cdot (H + 1,0) \cdot (4,0 \cdot B + \frac{(H + 1,0)}{0,33}) \cdot E_C \text{ (Cr\$)}$$

4.1.3. Restrições Impostas às Características Físicas e Operacionais das Embarcações

a) Comprimento Máximo do Comboio

A análise detalhada da inscrição do comboio nas curvas de mínimo raio de curvatura, com base na experiência de tráfego de hidroviárias (referências 11 e 12) onde se observaram ângulos máximos de deriva de comboio de 15º com corrente pela popa e 7º com corrente pela proa, indicou como mais segura a seguinte imposição.

$$L \leq \frac{R}{4}$$

Resultando portanto os seguintes comprimentos máximos das embarcações:

- Rota do Boiçu e Caxuanã 250 m
- Rota do Itaquara 150 m

b) Imposições das Sociedades Classificadoras

As Sociedades Classificadoras impõem limites máximos para as razões comprimento/pontal e boca/pontal. Utilizam os valores recomendados pelo Germanischer Lloyd's tem-se:

$$\frac{LC}{D} \leq 33$$

$$\frac{BC}{D} \leq 5$$

c) Demanda Mínima Anual (Q_{min})

A demanda anual a ser transportada pela frota de comboios é determinada pela necessidade de consumo do complexo Albrás/Alunorte, com uma margem de segurança de 10%.

A capacidade de transporte da frota é dada por:

$$Q = NE \cdot \frac{7920}{TVR} \cdot TPB$$

Assim, deve-se ter:

$$7920 \cdot \frac{NE \cdot TPB}{TVR} \geq Q_{min}$$

4.2. Formalização do Problema de Otimização

O objetivo do processo de otimização é a determinação das características da frota que apresente mínimo custo anual de transporte.

O custo total anual de transporte é dado por:

$$C = CI + CMT + OC + CR + CS + CA + CIH \text{ (função custo)}$$

Sendo que as parcelas componentes da função custo de transporte, são função das seguintes variáveis independentes, a saber:

- a) V , velocidade do comboio, em nós;
- b) LC , comprimento da chata, em m;
- c) BC , boca da chata, em m;

5. RESOLUÇÃO DO MODELO

- d) H, calado do comboio;
 e) NCL, número de chatas no sentido longitudinal do comboio;
 f) NCT, número de chatas no sentido transversal;
 g) NE, número de comboios (igual ao número de empurradores).

As restrições a serem obedecidas pelas variáveis independentes são:

- a) Restrições do comprimento:

$$NCL \cdot LC \leq L_{\max}$$

- b) Restrições da boca:

$$NCT \cdot BC \leq B_{\max}$$

- c) Restrições de calado:

$$H \leq H_{\max}$$

- d) Restrições na relação comprimento/pontal:

$$\frac{LC}{D} \leq 33$$

- e) Restrição estrutural na relação boca/pontal:

$$\frac{BC}{D} \leq 5$$

- f) Restrições de oferta mínima de transporte:

$$7920 \cdot \frac{NE \cdot TPB}{TVR} \geq Q_{\min}$$

Trata-se, portanto, de determinar os valores de sete variáveis independentes de maneira a minimizar o custo anual de transporte C, satisfeitas as restrições descritas.

Como resultado de desenvolvimento do item 4, recai-se num problema de otimização do seguinte tipo:

- minimizar a função de custo

$$C = f(X_1, \dots, X_n)$$

- sujeita às restrições

$$g_j = g_j(X_1, \dots, X_n) \geq 0; j = 1, m$$

onde $X_1, X_2, \dots, X_n$ são as variáveis independentes do problema.

A função de custo e as restrições são função com plexas e não lineares das variáveis independentes. Este fato elimina a possibilidade da utilização de métodos indiretos de otimização (máximo e mínimos de funções diferenciáveis, multiplicadores de Lagrange, etc.).

A unimodalidade da função e a convergência do método foram comprovadas inicializando-se o processo de busca de diferentes pontos de partida e obtendo como resultado final o mesmo valor de mínimo da função custo e das variáveis independentes (dentro de certos limites de precisão aceitáveis).

O método de Hooke-Jeeves associado à função de penalidade foi empregado conforme estudado na referência 10.

O problema de minimização inicialmente proposto pode ser transformado em:

$$H(X, 1) = f(X) + rP(X)$$

sendo:

$H(X, l)$: função da resposta

$f(X)$: função de custo cujo mínimo se quer determinar

$P(X)$: função de penalidade

A função de penalidade utilizada neste caso é da

da por:

$$P(X) = \sum_{j=1}^m \left\{ \min |0, g_j(X)| \right\}^2$$

portanto

$$H(X, r) = f(X) + r \sum_{j=1}^p \left\{ \max |0, g_j(X)| \right\}^2$$

6. ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE AS ROTAS

6.1. Rotas do Boiuçú e Ituquara

A solução ótima determinada para estas duas rotas, atendendo as restrições descritas na tabela 4, é apresentada na tabela 5.

Tabela 4. Restrições das Rotas

Rota	$L_{m\acute{a}x}$ (m)	$B_{m\acute{a}x}$ (m)	$H_{m\acute{a}x}$ (m)	d (km)
Boiuçú	250	30	5	1028
Ituquara	150	25	7	1102

Tabela 5. Solução Ótima

Variáveis	ROTA	
	Boiuçú	Ituquara
V nós	5,5	5,0
H (m)	5,0	7,0
LC (m)	72,7	76,8
BC (m)	14,9	10,8
NCL	3,4	2,0
NCT	2,0	2,3
NE	2,7	4,7
TPB (t)	$30,4 \times 10^3$	$18,4 \times 10^3$
V (m ³)	$34,1 \times 10^3$	$20,7 \times 10^3$
IHP (CV)	$1,8 \times 10^3$	$2,1 \times 10^3$
Custo Unitário (Cr\$/t)	43,18	61,71

A solução obtida para a rota do Boiuçú apresenta um custo de transporte significativamente menor do que a solução obtida para a rota do Ituquara. Isto mostra que apesar da rota do Ituquara ser vantajosa para navios convencionais que demandam esta área, devido ao maior calado permitido, o mesmo não ocorre

para comboios fluviais. A característica deste tipo de embarcação de poder adquirir as mais variadas configuração geométricas pela simples formação do comboio, permite maximizar o aproveitamento das dimensões da hidrovia. Enquanto a rota Ituquara permite o tráfego de navios convencionais de maior porte pelo maior calado oferecido, a rota do Boiuçú permite o tráfego de maiores comboios pela maior área de seção transversal do canal.

Notar que não é apenas devido a menor distância que a rota do Boiuçú apresenta um menor custo de transporte, pois mesmo em termos de Cr\$/t/Km esta rota é vantajosa.

Outro fato a ser ressaltado, é que apesar do comboio resultante para a rota do Ituquara ter menor porte e menor velocidade que o resultante para a rota do Boiuçú, ele requer maior potência instalada para a parada brusca. Enquanto na rota do Boiuçú a distância máxima percorrida nesta operação é de 750 metros, na rota do Ituquara limita-se a 450 metros, devido a uma posição de $S_g \leq 3 \cdot L_{\max}$.

6.2. Rota do Caxuanã

Esta rota apresenta as mesmas restrições que a rota do Boiuçú (Tabela 4). Estima-se que para a ligação entre os rios Caxuanã e Ipixuna será necessário abrir um canal retilíneo com cerca de 50 km de extensão. A seção transversal do canal será função das dimensões do comboio. A solução ótima resulta de uma otimização conjunta embarcação-canal, de forma a ter-se o mínimo custo global, dado pela soma dos custos operacionais da embarcação com o custo de remuneração e amortização dos investimentos necessários para construção da frota e abertura do canal.

Para o canal com a geometria apresentada na figura 5., com custo de abertura de Cr\$ 48,00/m³, obtêm-se as soluções apresentadas na tabela 6, com calado variando de 3,0 a 6,0 metros.

Os resultados obtidos permitem concluir que para um canal artificial com 50 km de extensão):

- a) a solução do mínimo custo de transporte corresponde ao canal de 4,0m, portanto canal de interligação dos rios com profundidade de 5,0 m;
- b) a solução de canal sem cruzamento ($b = 2 \cdot B$), com tráfego de embarcações apenas num sentido por vez, apresenta custo de transporte 19% menor do que a alternativa de canal com cruzamento ($b = 4 \cdot B$). Mas apresenta também redução da capacidade de tráfego de no mínimo 50%. A escolha entre estas duas alternativas, com ou sem cruzamento, deve levar em conta outros aspectos tais como: compatibilização entre capacidade de tráfego e demanda prevista, possibilidade de construção de bacias de cruzamento ao longo do canal, tempo de espera das embarcações na entrada do canal;
- c) o menor custo de transporte obtido para esta hidrovia, canal sem cruzamento com calado de 4,0 metros, é 26% maior do que o obtido para a rota do Boiuçú e 12% menor do que o obtido para a rota do Ituquara.

A hidrovia do Caxuanã é uma alternativa a ser considerada quando o fluxo de embarcações na região estiver próximo do limite da capacidade da rota do Boiuçú.

Tabela 6. Resultados Obtidos para a Rota do Caxuanã

H (m)	L (m)	B (m)	$V \times 10^{-3} (m^3)$	$C (Cr\$/t)$	$S_c (m^2)$
a) b = 4.B (com cruzamento)					
3,0	250,0	22,8	16,2	68,7	370,0
4,0	248,0	22,6	20,6	67,3	460,0
5,0	215,0	19,7	19,0	69,3	484,7
6,0	214,0	19,5	21,9	72,1	560,7
b) b = 2.B (sem cruzamento)					
3,0	250,0	24,2	17,4	58,5	198,9
4,0	249,0	22,7	21,0	54,5	235,2
5,0	222,0	20,2	20,1	56,0	254,3
6,0	222,0	20,2	23,6	56,9	299,0

A comparação entre as três rotas alternativas mostrou que a rota do Boiúçu é a que permite o tráfego de comboio de menor custo de transporte. Uma vez eleita esta alternativa de rota como a melhor far-se-á uma análise detalhada das características do comboio.

6.3. Análise da Solução Obtida para a Rota do Boiúçu

6.3.1. Análise do Calado do Comboio

A tabela 7 mostra o efeito da variação do calado entre 3,0 e 6,0 metros, mantidos os valores de L_{max} da tabela 4, sobre o TPB, velocidade e custo de transporte.

Tabela 7. Efeito do Calado nas Características do Comboio

H (m)	V (nós)	TPB $\times 10^{-3}$	C (Cr\$/t)
3,0	5,9	18,9	50,37
4,0	6,0	24,9	45,23
5,0	5,5	30,4	43,18
6,0	5,6	33,1	42,15

Observa-se que para calado acima de 5,0 metros não existe uma redução significativa do custo de transporte decorrente do aumento de calado. O aumento de calado de 5,0 m (máximo permitido) para 6,0 m (poderá ser obtido mediante dragagens em locais restritivos) traria uma redução de apenas 2,4% no custo de transporte. Assim, enfocando apenas o transporte de bauxita, o máximo calado atual da hidrovia está adequado as demais restrições (comprimento máximo e boca máxima). A figura 5 mostra o custo em função de V e v e consequentemente H.

6.3.2. Limitação da Razão V/IHP

A solução ótima obtida apresenta um valor bastante alto para o coeficiente V/IHP . A capacidade de manobra e o próprio tempo de resposta da embarcação é, em geral, inversamente proporcional a este coeficiente.

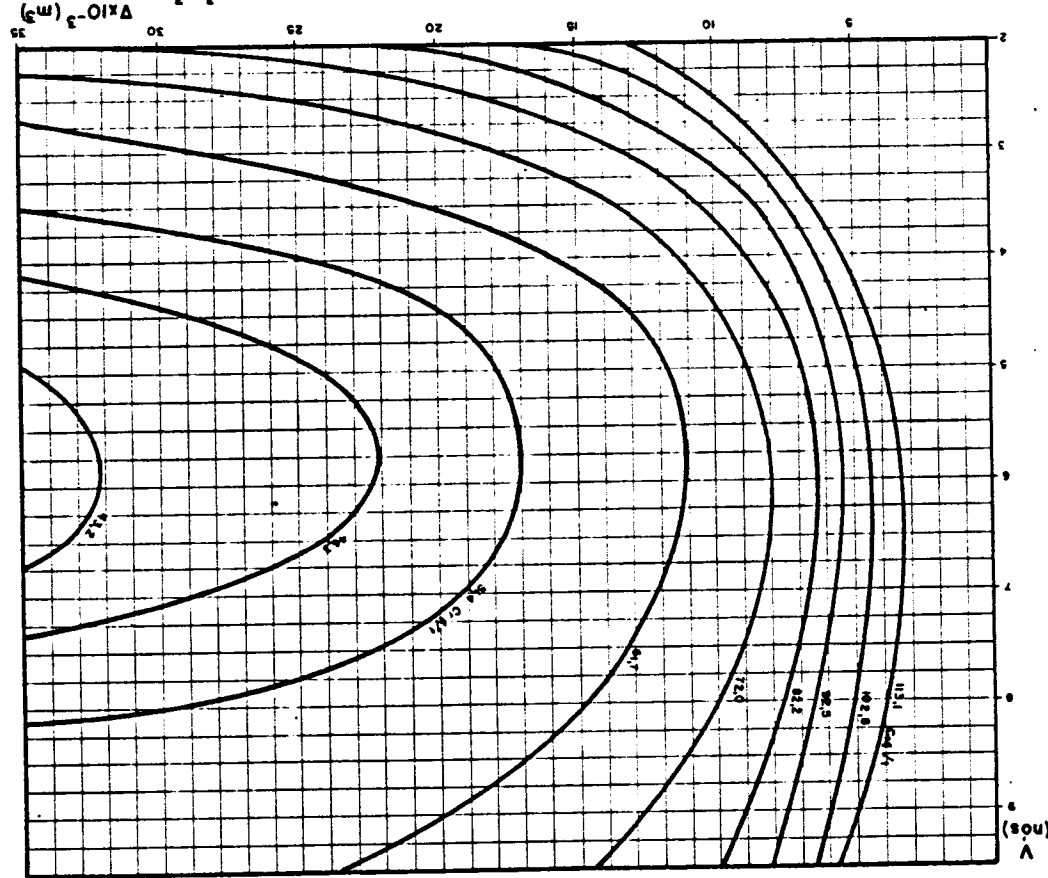
É usual a operação de grandes comboios com o coeficiente V/IHP de aproximadamente 10,0.

Impondo-se esta restrição adicional ao problema, V/IHP igual a 10,0 obteve-se a seguinte solução ótima.

V	=	6,6	nós
LC	=	69,3	m
BC	=	13,6	m
NCL	=	3,6	
NCT	=	2,1	
NE	=	2,5	
TPB	=	$28,5 \times 10^3$	t
V	=	$32,0 \times 10^3$	m^3
IHP	=	$3,2 \times 10^3$	CV
C	=	45,23	Cr\$/t

Como era de se esperar resultou uma velocidade maior, com o custo de apenas 4,7% superior a solução inicial.

Figura 5: Custo de Transporte de Comboios Homotéticos do Comboio de $31,7 \times 10^3 \text{ m}^3$ ($L=250-B=30-H=5,0$)



A solução ótima obtida para a rota do Boliuçu apresenta valores fracionários para as variáveis NCL, NCT e NE, uma vez que estas variáveis são tratadas como reais no processo de otimização.

Para determinação da solução ótima corresponde te a valores inteiros destas variáveis, pesquisaram-se todas as combinações possíveis de valores inteiros destas variáveis em torno do valor real corresponde a solução ótima inicial.

A tabela 8. resume os resultados obtidos no processo de otimização com o custo função apenas de 4 variáveis independentes (V, LC, BC, H), para os valores pré-fixados de NCL, NCT e NE.

Tabela 8. Soluções obtidas com as variáveis NCL, NCT e NE assumindo valores inteiros em torno do ponto ótimo.

NCL	NCT	NE	V(nós)	TPBx10 ⁻³ (t)	c (Cr\$/t)
3	2	2	8,0	30,5	53,46
3	2	3	5,4	28,2	44,20
4	2	2	8,0	30,5	52,43
4	2	3	5,5	27,3	43,18

Observa-se que existem 2 soluções equivalentes para a formação do comboio. O comboio 4 x 2 (NCL x NCT) apresenta o mesmo custo de transporte que a solução com variáveis reais de terminada inicialmente. O comboio 3 x 2 apresenta um custo de transporte 2,4% superior, mas apresenta sob o aspecto operacional duas vantagens:

- chata com dimensões maiores, e em menor número, facilitando a operação portuária e reduzindo o tempo de "recheio" do porão de carga (retirada da última camada de minério)

rio que fica no fundo do porão).

- maior segurança de navegação devido maior rigidez do comboio formado com 6 chatas em relação ao comboio de 8 chatas.

7. BIBLIOGRAFIA

01. BALAU, J.A.C. Otimização de comboio integrado de chata, para transporte de bauxita na Amazônia, EPUSP dissertação de mestrado, 1981.
02. AUCHER, M. Stopping of ships. A General Survey 139. International Towing Tank Conference, Hamburgo, 1972.
03. BALAU, J.A.C. Dimensionamento de comboio fluviais para transporte de Bauxita na REGIÃO Amazônica. Seminário de pós-graduação, EPUSP, São paulo, 1976.
04. BOX, J.M. DAVIES, D. & SWANN, W. N. Nolinear optimization techniques. Olivier & Boyd, Edinburgh, 1969.
05. DESALVO, T.S. On acceleration of barge tows. Journal of the Waterways and Harbors Division, ASCE, 1969.
06. ESTAI-IPT-ENGÉVIX Transporte de bauxita na Amazônia. Docenave, São Paulo, 1980.
07. FOX, R. Optimization methods for engineering desing. Addison-Wesley, London, 1973.
08. GERMANISCHER LLOYD Rules for the classification and construction of inland steel ships. Edição de 1976.
09. IPT Determinação da resistência à propulsão de uma série de comboios fluviais integrados. CNP_q, São Paulo, 1978.
10. NOVAES, A.G.N. Métodos de otimização. Edgard Blücher, São Paulo, 1978.
11. PIANC, Permanent International Association of Navigation Congressess, XX9 Congresso, seção 1, Bruxelas, 1961.
12. PIANC, Permanent International Association of Navigation Congressess, XX9 Congresso, seção 1, Estocolmo, 1965.