

INFLUÊNCIA DAS CONDIÇÕES DE OPERAÇÃO PORTUÁRIA SOBRE
O DIMENSIONAMENTO DE COMBOIOS FLUVIAIS

MARCO ANTONIO BRINATI

Prof.Dr.-Centro de Estudos e Pesquisas do
Departamento de Engenharia Naval da Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo .

Dr.em Engenharia Naval - Universidade de
São Paulo.Ocean Engineer and Master of
Science in Operations Research - MIT.

ABSTRACT

This paper shows a comparative analysis of two basic ways of operating a tow fleet with the aim to decide whether or not the towboat should wait for the barges unloading and loading at the ports.

It is firstly shown a queue model estimate the waiting time of the towboats at the terminal. Next, an economic analysis is developed for selecting the best way of operating the tow; from this analysis one realizes that the selection of the best alternative depends on two nondimensional parameters: one of operational nature —the traffic intensity of the ports and other of economical kind —the ratio of barges cost and the towboat cost.Finally the results of the both operational and economic analysis are used to determine the fleet size; for each pair of the parameters values, one calculates the most efficient way of operating the tow.

RESUMO

Este trabalho mostra uma análise comparativa de duas formas básicas de operação de comboios fluviais, com o objetivo de se de

cidir se o empurrador deve aguardar ou não pelo atendimento das barcas nos portos.

Inicialmente é apresentado e resolvido um modelo de fila para determinar o tempo de espera dos empurradores nos portos. A seguir, procede-se a uma análise econômica para definir a configuração de operação de comboios; desta análise conclui-se que a escolha da configuração depende de dois parâmetros adimensionais: um de natureza operacional — o índice de congestionamento dos portos, e outro de natureza econômica — a relação entre os custos de aquisição do conjunto de barcas e do empurrador que compõem o comboio. Na parte final os resultados do modelo de fila e da análise econômica são utilizados para o dimensionamento de uma frota de comboios fluviais; para cada par de valores dos parâmetros, determina-se a configuração operacional economicamente mais eficiente.

permanência dos empurradores nos portos e, em consequência, o número de empurradores da frota, às custas de um aumento da quantidade de barcas (pois além das barcas associadas a cada empurrador há aquelas que permanecem nos portos). É óbvio que, nesta comparação, os custos do empurrador e das barcas desempenham papéis importantes.

Menos óbvio, mas fundamental para o correto equacionamento do problema, é determinar o número de barcas adicionais quando se opta pelo sistema com desmembramento. O ponto básico para que se chegue a uma solução apropriada é a avaliação, para cada alternativa, dos tempos de espera do empurrador no porto.

Nos estudos sobre dimensionamento de comboios fluviais, a estimativa do tempo de permanência nos portos não tem recebido um tratamento aprofundado. Muitos adotam valores empíricos para o tempo de espera; outros utilizam modelos de fila simplificados (para situações em que não há desmembramento). Não foi encontrado nenhum trabalho que desse um tratamento adequado aos casos em que ocorre desmembramento.

A vista do que foi acima mencionado, uma contribuição importante da pesquisa foi o desenvolvimento de uma metodologia para estudar o processo de fila dos empurradores, aplicável igualmente a casos com e sem desmembramento e que contempla diversas alternativas com respeito ao número de barcas adicionais. As idéias básicas dessa metodologia constam de trabalho anterior [1], mas a utilização dos resultados do modelo de fila em um estudo econômico a parece pela primeira vez no presente trabalho.

Na seção 2 é apresentada a metodologia para estudo da fila dos empurradores, com a determinação da equação que caracteriza a distribuição estacionária dos tempos de espera; a solução desta e

1. INTRODUÇÃO

Este trabalho apresenta parte dos resultados de uma pesquisa referente ao dimensionamento de sistemas de transporte fluvial, desenvolvida pela Área de Transportes do Centro de Estudos e Pesquisas do Departamento de Engenharia Naval da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo - CEPEN-USP, com o apoio da FINEP.

Uma das etapas da pesquisa correspondeu à elaboração de um submodelo para análise operacional do sistema de transporte; as principais tarefas desta etapa foram a determinação dos tempos de passagem pelas eclusas e de permanência nos portos e o dimensionamento da frota para diferentes configurações de operações do comboio. Neste trabalho será ressaltada a escolha da configuração mais apropriada através de uma análise econômico-operacional do sistema.

Uma questão fundamental em projetos de transporte fluvial se prende à opção entre desmembrar ou não o comboio nos portos; com o desmembramento, o empurrador, em lugar de esperar pelo descarregamento e/ou descarregamento das barcas que ele conduziu ao porto, vai transportar um conjunto de barcas que chegou ao terminal há mais tempo. Com este procedimento, consegue-se reduzir o tempo de

quação e o posterior cálculo de sua expectância se faz através de procedimento numérico. Na seção 3, mostra-se, para um problema de transporte selecionado, uma comparação econômica entre as diferentes configurações de operação do comboio, tendo como objetivo a redução do custo de transporte; a principal restrição do problema escolhido é a existência de apenas dois portos servidos pelos comboios, mas a inclusão de portos intermediários não modifica essencialmente a análise desenvolvida nem os resultados obtidos. Fica evidenciado que a escolha da configuração mais eficiente depende de dois parâmetros adimensionais: um de natureza operacional — o índice de congestionamento ρ_p do porto, e outro de natureza econômica — a relação γ entre os custos de aquisição do conjunto de barcas e do empurrador que compõem o comboio. Na seção 4, adotada uma estrutura de custos, determina-se no plano ρ_p e γ as regiões em que cada configuração (sem desmembramento, com desmembramento e correspondente número de barcas adicionais) é mais eficiente.

2. O MODELO DE FILA PARA O ATENDIMENTO DE COMBOIOS FLUVIAIS NOS PORTOS

2.1- O modelo adotado

Como objetivo principal do trabalho é mostrar, a partir da solução do modelo de fila, a escolha da configuração operacional mais eficiente do ponto de vista econômico, todo o desenvolvimento comtemplará apenas um modelo de fila, razoavelmente abrangente, embora outros tenham sido tratados ao longo da pesquisa.

A abrangência do modelo escolhido é explicada pela escolha das distribuições utilizadas para representar os intervalos entre chegadas consecutivas dos comboios aos portos e os tempos de atendi-

mento nos portos. Para estes foi adotada uma distribuição normal e para aqueles uma distribuição Erlang de ordem genérica k . Uma limitação do modelo escolhido para a presente análise é que ele admite que não haja atendimento simultâneo de dois comboios. (Na realidade, a metodologia desenvolvida aplica-se ao modelo G/G/1, sendo possível substituir as distribuições normal e Erlang por outras distribuições quaisquer. No programa de computador que resolve o modelo de fila, basta alterar as subrotinas referentes às distribuições de intervalos entre chegadas e de tempos de atendimento.)

2.2 - A solução do modelo de fila

Cabe mencionar inicialmente o que se entende por solução do modelo de fila. Para avaliação econômica do sistema de transporte, é necessário determinar o tempo médio de espera dos empurradores nos terminais, e este é o objetivo último do procedimento aqui apresentado, que fornece também, como subproduto, a distribuição dos tempos de espera.

Para que haja um único tratamento que englobe as configurações de operação com e sem desmembramento do comboio nos portos, é conveniente definir uma variável inteira p que caracterize o tipo de configuração, da seguinte forma. Seja n o contador do número de chegadas de comboios ao porto em estudo; diz-se que a configuração operacional é do tipo p , se o empurrador $(n+p)$, ao se separar das barcas $(n+p)$, se une ao conjunto de barcas n (traçadas ao porto pelo empurrador n). A configuração do tipo zero representa o caso em que não há desmembramento.

A figura 2.1 mostra uma representação esquemática dos processos de chegada e atendimento dos comboios no porto; nessa figu-

ria W_{n+p}^e . Esta função pode ser determinada a partir das distribuições das variáveis aleatórias W_n^b , V_n^b e ζ_p , utilizando a relação (2.1). A variável V_n^b tem uma distribuição normal conhecida enquanto que ζ_p , a soma de p variáveis Erlang de ordem k , é uma variável Erlang de ordem kp . A distribuição da variável W_n^b , porém, não é conhecida a priori e deve ser determinada pela solução do processo de fila das barcasas. Seja $H_n^b(w) = P[W_n^b \leq w]$ a função de repartição da variável W_n^b ; então, a partir da relação (2.1) obtém-se para cálculo de $H_{n+p}^e(w)$ a seguinte expressão:

$$H_{n+p}^e(w) = \int_0^w \left[\int_0^{\infty} \phi_{kp}(\lambda(w - v_n + v_n)) g(v_n) dv_n \right] dH_n^b(w) \quad (2.2)$$

onde:

$$\phi_{kp}(x) = e^{-x} \sum_{n=0}^{kp-1} \frac{x^n}{n!} \quad (2.3)$$

e $g(v_n)$ é a função densidade normal dos tempos de atendimento das barcasas e k/λ é a expectância dos intervalos entre as chegadas consecutivas de comboios ao porto.

A figura 2.2 ilustra o relacionamento entre as variáveis que atuam no processo de fila das barcasas. A única variável ainda não definida τ_n é o intervalo de chegada entre os comboios $n-1$ e n .

O tempo de espera das barcasas do comboio n , W_n^b pode ser calculado através da relação:

$$W_n^b = \begin{cases} W_{n-1}^b + V_{n-1}^b - \tau_n, & \text{se } \tau_n \leq W_{n-1}^b + V_{n-1}^b \\ 0, & \text{se } \tau_n > W_{n-1}^b + V_{n-1}^b \end{cases} \quad (2.4)$$

cujas semelhança com (2.1) é desnecessário frisar. Por isto, também

-6-

ra as variáveis tem o seguinte significado:

- s_n - instante de chegada ao porto do comboio n ;
- W_n^b - tempo de espera das barcasas do comboio n ;
- V_n^b - tempo de atendimento das barcasas do comboio n ;
- ζ_p - intervalo entre as chegadas dos comboios n e $n+p$;
- W_{n+p}^e - tempo de espera do empurrador ($n+p$), que vai transportar as barcasas do comboio n .

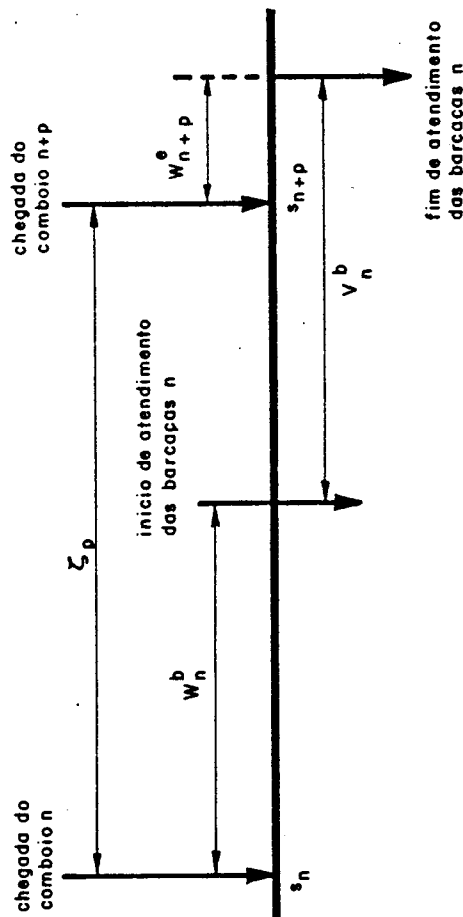


Fig.2.1 - Representação esquemática dos processos de chegada e atendimentos das barcasas

O tempo de espera do empurrador $n+p$, W_{n+p}^e , pode ser calculado através da relação

$$W_{n+p}^e = \begin{cases} W_n^b + V_n^b - \zeta_p, & \text{se } \zeta_p \leq W_n^b + V_n^b \\ 0, & \text{se } \zeta_p > W_n^b + V_n^b \end{cases} \quad (2.1)$$

Seja $H_{n+p}^e = P[W_{n+p}^e \leq w]$ a função de repartição da variável aleató-

Voltando à fila de empurradores e admitindo $\rho_p < 1$, a distribuição estacionária dos tempos de espera dos empurradores $H_p^e(w)$ será dado pela relação:

$$H_p^e(w) = \int_0^\infty \left[\int_0^\infty \phi_{kp}(\lambda(w_n - w + v_n))g(v_n)dv_n \right] dH^b(w_n) \quad (2.7)$$

O índice inferior p caracteriza o tipo de configuração operacional do comboio nos portos, ou seja indica que no porto são mantidos p conjuntos adicionais de barcas para reduzir o tempo de espera dos empurradores.

Como não se consegue obter uma solução analítica para a equação integral (2.6), a distribuição $H^b(w)$ é obtida através de um processo numérico iterativo que, utilizando a relação (2.5), calcula sucessivamente a partir de uma condição inicial arbitrária $H_1^b(w)$ as funções de repartição $H_2^b(w)$, $H_3^b(w)$, ..., até que se encontre um N tal que para $\epsilon > 0$, convenientemente selecionado, seja satisfeita a condição:

$$[H_N^b(w) - H_{N-1}^b(w)] \leq \epsilon, \text{ para todo } w$$

Aceita-se, então, que $H^b(w) = H_N^b(w)$, após o que é possível determinar a distribuição procurada $H^e(w)$ pela expressão (2.7).

Para encerrar esta seção, convém mencionar que, com a finalidade de eliminar o efeito de escala (e, assim, permitir que a solução de um processo de fila se aplique a todos os processos em condições semelhantes de operação) foi introduzida a variável adimensional $Z = W/E(V)$. Isto é, o tempo de espera passou a ser medido em termos do tempo médio de atendimento. Com esta modificação, fica explícita em relações semelhantes a 2.6 e 2.7 a influência do índice

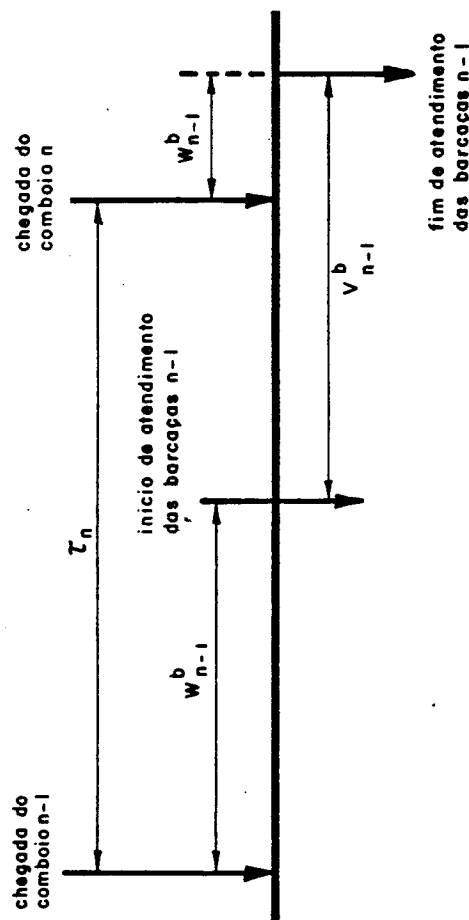


Fig.2.2 - Ilustração esquemática do processo de fila das barcas

não causa surpresa que de (2.4) obtenha-se para a função de repartição $H_n^b(w)$ o seguinte resultado:

$$H_n^b(w) = \int_0^\infty \left[\int_0^\infty \phi_k((w_{n-1} - w + v_{n-1}))g(v_{n-1})dv_{n-1} \right] dH_{n-1}^b(w_{n-1}) \quad (2.5)$$

Se o índice de congestionamento do porto ρ_p (definido como a relação entre a expectância do tempo de atendimento das barcas de um comboio e o intervalo entre as chegadas de dois comboios consecutivos) for menor que 1, então a sequência de funções $\{H_n^b(w)\}$, $n=1,2,\dots$, converge para a distribuição estacionária $H^b(w)$. Assim, a relação (2.5), com a substituição de $H_n^b(\cdot)$ e $H_{n-1}^b(w)$ por $H^b(\cdot)$, se transforma em uma equação integral para a determinação da distribuição estacionária:

$$H_b(w) = \int_0^\infty \left[\int_0^\infty \phi_k(\lambda(w_{n-1} - w + v_{n-1}))g(v_{n-1})dv_{n-1} \right] dH(w_{n-1}) \quad (2.6)$$

de congestionamento ρ_p .

3. AVALIAÇÃO ECONÔMICA DAS DIFERENTES CONFIGURAÇÕES DE OPERAÇÃO

Nesta seção mostra-se um critério econômico para comparação das diferentes alternativas de operação portuária; a partir da formulação para o dimensionamento da frota, ficam evidenciados os parâmetros que influem sobre a escolha da altura ótima.

3.1- O problema de transporte considerado

Para comparação econômica entre as diferentes configurações de operação do comboio nos portos, foi considerado um problema de transporte fluvial com as seguintes características:

- i) a frota a ser dimensionada opera entre dois portos, separados por uma distância d (km);
- ii) a demanda para o transporte de carga é a mesma em ambos os sentidos, com um valor Q (t/ano);
- iii) as velocidades de carregamento e descarregamento da carga nos dois portos têm o mesmo valor $v(t/h)$;
- iv) todos os comboios são iguais, sendo constituídos por um empurrador e n_b barcaças, cada qual transportando uma quantidade de carga $DTW_b(t)$, e se deslocam a uma velocidade média V (km/h);

3.2- O critério econômico para comparação das alternativas

Desde que, para qualquer alternativa a quantidade de carga transportada por ano é a mesma, um critério econômico adequado para efetuar a comparação é o custo médio anual de transporte. (isto vale, quer se trate de uma empresa privada que procure maximizar

o seu lucro, quer seja uma empresa pública, que busque uma alocação mais eficiente dos recursos para atender objetivos sociais).

As parcelas principais do custo de transporte fluvial são aquelas referentes à amortização do capital utilizado para aquisição das embarcações e às despesas com combustível (e lubrificante). Outras parcelas significativas são as despesas com reparos e manutenção, seguro e tripulação.

Como, qualquer que seja a configuração operacional escolhida, o número de viagens anuais é o mesmo, as despesas de combustível, embora importantes, não afetam a comparação. Pelo mesmo motivo, admite-se que as despesas com a tripulação sejam iguais para todas as alternativas.

Despesas menores, como as portuárias, serão consideradas invariantes entre as diferentes opções, enquanto que os custos administrativos serão considerados como proporcionais aos gastos diretos. Nenhum deles, pois, será incluído, na análise econômica.

Sejam C_e e C_b os custos de aquisição de um empurrador e de uma barcaça, respectivamente; o custo anual médio de capital para uma frota com N_e empurradores e N_b barcaças, CAMC é dado por:

$$CAMC = \frac{(i+i)^N - 1}{i(1+i)^N} \cdot (N_e C_e + N_b C_b) = \lambda_1 (N_e C_e + N_b C_b) \quad (3.1)$$

onde i é a taxa anual de juros e N é a vida útil das embarcações.

As despesas anuais de manutenção e reparo e as de seguro são normalmente cotadas como frações do valor da embarcação; sejam respectivamente λ_2 e λ_3 as constantes de proporcionalidade destas despesas com relação ao custo de aquisição das embarcações. Para levar em conta despesas de manutenção e reparos eventualmente mais altas no caso dos empurradores (em virtude dos gastos com a insta-

lação propulsora) serão distinguidos coeficientes λ_{2e} λ_{2b} . Assim, o custo anual médio para comparação econômica das diferentes alternativas, CAM, é dado por:

$$CAM = (N_e C_e + N_b N_b)(\lambda_1 + \lambda_3) + \lambda_{2e} N_e C_e + \lambda_{2b} N_b C_b \quad (3.2)$$

3.3- Dimensionamento da frota

Admitindo que o número de conjuntos adicionais de barcasas seja o mesmo p para ambos os portos, o número de barcasas da frota, N_b , pode ser expresso em função de N_e através da relação:

$$N_b = n_b(N_e + 2p) \quad (3.3)$$

O número de empurradores da frota N_e é dado por:

$$N_e = \frac{Q}{NVR_e \cdot n_b \cdot DWT_b} \quad (3.4)$$

onde NVR_e , número anual de viagens redondas de cada empurrador, é calculado pela relação:

$$N_e = \frac{24 A}{2(d/v + w_e(p))} \quad (3.5)$$

em que A representa o número anual de dias de operação do empurrador e $w_e(p)$ é a expectância do tempo de espera no porto do empurrador para configuração p .

Medindo o tempo de viagem, d/v , e o tempo de espera, $w_e(p)$, em termos do tempo médio de atendimento do conjunto de n_b barcasas, $TMA = 2n_b DWT_b/v$, através das relações:

$$d/v = \beta \cdot TMA$$

(3.6)

$$w_e(p) = w_e(p)TMA$$

e observando que o índice de congestionamento, ρ_p , pode ser calculado pela relação:

$$\rho_p = \frac{2Q}{v \cdot NHP} \quad (3.7)$$

onde NHP é o número anual de horas de operação em cada porto, obtêm-se das relações (3.4) e (3.5) o seguinte resultado para cálculo de N_e :

$$N_e = \frac{\rho_p \cdot NHP}{12A} (\beta + w_e(p)) \quad (3.8)$$

3.4- Os parâmetros que definem o critério econômico

Chamando de $\gamma = n_b C_b / C_e$ a relação entre os custos das barcasas e do empurrador que formam um comboio e substituindo em (3.2) os valores de N_b e N_e expressos pelas relações (3.3) e (3.8) respectivamente, obtém-se o seguinte resultado:

$$CAM = C_e \left[\frac{\rho_p \cdot NHP}{12A} (\beta + w_e(p)) \left[(1+\gamma)(\lambda_1 + \lambda_3) + \lambda_{2e} + \gamma \lambda_{2b} \right] + 2\gamma(\lambda_1 + \lambda_{2b} + \lambda_3) \right] \quad (3.9)$$

Assim, a comparação econômica entre as diferentes alternativas pode ser efetuada por meio da relação CAM/C_e . É importante notar que em (3.9) a parcela dependente do tempo de viagem não afeta a comparação entre as diversas opções. Esta conclusão poderia sur-

preender aqueles que acreditam que o desmembramento é mais indicado para viagens curtas, nas quais o tempo nos portos se torna uma fração mais ponderável do tempo total de viagem redonda.

A expressão (3.9) mostra que, para uma dada estrutura de custos definidos pelos parâmetros λ_1 , λ_2 e λ_3 , a escolha entre as diversas configurações de operação depende de dois parâmetros ρ_p e γ (já que $w_e(p)$ depende de ρ_p); a importância de ρ_p na comparação econômica se deve principalmente à sua influência indireta através de $w_e(p)$.

Ao término desta seção, é importante mencionar que, embora a expressão obtida para a figura de mérito a ser utilizada na seleção da configuração ótima dependa das hipóteses adotadas, nenhuma delas é indispensável para a análise feita, sendo possível modificá-la ou suprimi-la sem afetar a essência do resultado encontrado.

4. SELEÇÃO DA CONFIGURAÇÃO ÓTIMA

Nesta seção serão utilizados os resultados do modelo de fila estudado na seção 2 e da análise econômica efetuada na seção 3 a fim de determinar, para o problema de transporte já especificado, a configuração ótima de operação do comboio fluvial nos portos. O problema a ser resolvido, conforme se depreende da figura de mérito encontrada ao fim da seção 3, é:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{minimizar} \\ p \end{array} \right\} \left\{ \begin{array}{l} \frac{\rho_p \text{ NHP}}{12A} w_e(p) [(1+\gamma)(\lambda_1 + \lambda_3) + \lambda_{2e} + \gamma\lambda_{2b}] + \\ + 2p\gamma(\lambda_1 + \lambda_{2b} + \lambda_3) \end{array} \right\} \quad (4.1)$$

conhecida a estrutura de custos, defina pelos parâmetros γ , λ_1 , λ_2 e λ_3 , e as características operacionais, definidas pelos parâmetros ρ_p , NPP e A.

Como ρ_p e γ são os parâmetros fundamentais para a seleção da alternativa economicamente mais vantajosa, o problema (4.1) é resolvido para diferentes valores desses parâmetros. Para cada um dos demais parâmetros foi adotado um valor único.

As hipóteses adotadas para a solução do problema (4.1) são as seguintes:

- (i) a distribuição dos intervalos entre chegadas consecutivas dos comboios a cada porto é Erlang de ordem 2;
- (ii) a distribuição dos tempos de atendimento das barcas de um comboio é normal com coeficiente de variação igual a 0,2;
- (iii) a vida útil das embarcações é 20 anos e a taxa anual de juros é 15%, para cálculo do custo de capital, representado pelo parâmetro λ_1 ;
- (iv) $\lambda_{2e} = 0,05$, $\lambda_{2b} = 0,025$, $\lambda_3 = 0,015$;
- (v) A = 340 dias, NHP = 8400 horas.

A figura (4.1) mostra a solução do problema (4.1) para diferentes valores do par (ρ_p , γ). O número de cada região desta figura identifica a configuração ótima para os correspondentes valores do índice de congestionamento, ρ_p , e da relação entre custos de aquisição das barcas e do empurrador, γ . Assim, por exemplo, para $\rho_p = 0,85$, a configuração ótima é definida por $p=5$, para valores de γ entre 0,10 e 0,12, por $p=4$ para γ entre 0,12 e 0,24, por $p=3$ para γ entre 0,24 e 0,40.

para γ entre 0,24 e 0,51, $p=2$ para γ entre 0,52 e 1,40, por $p=1$ para γ entre 1,40 e 7,88 e por $p=0$ para $\gamma > 7,88$. Do ponto de vista estritamente qualitativo, esta mostra um resultado óbvio: para um dado valor do índice de congestionamento, o incentivo para a utilização do desmembramento diminui a medida que aumenta a relação entre os custos das barcas e o custo do empurrador. Também, óbvio, do ponto de vista qualitativa, é a conclusão que se obtém, quando se acompanha na figura 4.1 o aumento do índice de congestionamento para um dado valor de γ : com o crescimento de ρ_p surge o estímulo para o desmembramento e para o aumento do número de conjuntos adicionais de barcas.

5. CONCLUSÕES

A seção 4 mostrou o alcance da metodologia desenvolvida nas seções 2 e 3 para a análise econômico-operacional e dimensionamento de sistemas de transporte fluvial. Os resultados obtidos na figura 4.1 são válidos para um dado problema de transporte, com as hipóteses mencionadas, mas a mesma metodologia pode ser utilizada para qualquer problema semelhante. E serão encontradas curvas, análogas as da figura 4.1, definindo no plano (ρ_p, γ) regiões onde cada configuração tem vantagem sobre as demais.

É evidente que se atingiu o objetivo desejado, pois foi desenvolvido um procedimento racional para responder a questão levantada no início deste trabalho. Com a utilização desse procedimento é possível saber quando é que se deve efetuar o desmembramento do comboio nos portos e, em tal caso, especificar o número de jogos adicionais de barcas que devem ser mantidos no porto.

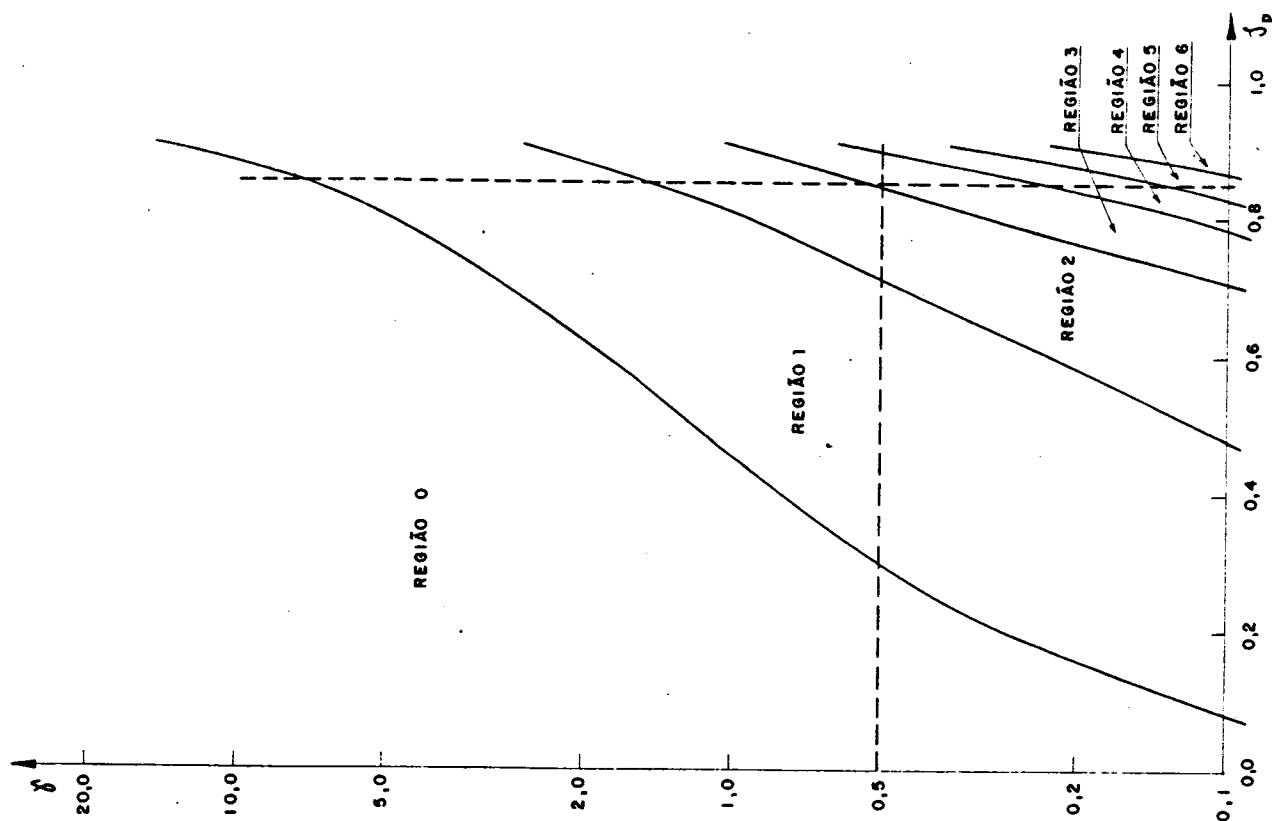


Fig. 4.1 - Seleção da configuração ótima

6. BIBLIOGRAFIA

1. Brinati, M.A., Tonon, J.V., Gueler, G.F. "Avaliação dos tempos de espera e atendimento de comboios fluviais em portos", 2º Congresso de Desenvolvimento Tecnológico de Transportes, São Paulo, 1981.