

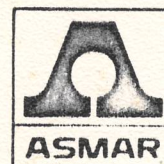
**VII CONGRESO PANAMERICANO
DE INGENIERIA NAVAL,
TRANSPORTE MARITIMO E
INGENIERIA PORTUARIA**

Viña del Mar (Chile), 19-24 de Octubre, 1981.

Convoca:



Organiza:



DETERMINAÇÃO DOS TEMPOS DE ESPERA E TRANSPOSIÇÃO DE UMA ECLUSA

MARCO ANTONIO BRINATI
PROF. DR. - EPUSP - BRASIL

EDUARDO W.R. RAMALHO
MESTRANDO EM ENGENHARIA
EPUSP - BRASIL

VALDAIR JOSÉ TONON
MESTRANDO EM ENGENHARIA
EPUSP - BRASIL

DETERMINAÇÃO DOS TEMPOS DE ESPERA E TRANSPOSIÇÃO DE UMA ECLUSA

Marco Antonio Brinati
Eduardo W.R. Ramalho
Valdair J. Tonon

1 - Introdução

Um dos pontos críticos no projeto de sistemas de transporte é a estimação dos tempos de espera e transposição de eclusas existentes ao longo da hidrovia. A quantificação destes tempos é necessária para cálculo do custo de transporte e determinação do tempo total de viagem e, em consequência, para o dimensionamento da frota de embarcações destinadas ao atendimento da demanda de transporte. Além disto, o tempo de transposição, juntamente com a capacidade de carga das embarcações, estabelece um limite para o transporte de carga através daquele trecho da hidrovia.

O tempo de transposição pode ser estimado a partir do conhecimento das características físicas e operacionais da eclusa; para estimar-se o tempo de espera é necessário estudar conjuntamente os processos de chegada e atendimento de embarcações em uma eclusa.

No caso geral, ambos os processos são aleatórios e a determinação do tempo médio de espera se faz pela solução de processos estocásticos conhecidos como processos de fila.

A solução analítica dos processos de fila está restrta a alguns modelos com características peculiares que, em muitas condições, não representam adequadamente o processo real. Para modelos mais gerais é comum a utilização das técnicas de simulação probabilística para obter uma estimativa do tempo médio de espera. Este trabalho mostra a utilização de um procedimento analítico-numérico para solução do modelo G/G/1, que é o modelo mais geral para representar a fila de embarcações junto a uma eclusa.

Na seção 2, são apresentadas as componentes do processo de transposição de uma eclusa; na seção 3 mostra-se a maneira de modelar o processo de fila e a escolha da representa-ção mais apropriada; na seção 4 mostra-se o procedimento analítico numérico para cálculo da expectância do tempo de espera; na seção 5, este procedimento é utilizado para cálculo do tempo médio de espera das embarcações junto à eclusa de Porto Primavera, no rio Paraná.

2 - O processo de Transposição

O tempo dispendido por uma embarcação para transpor uma eclusa pode ser subdividido nas seguintes componentes:

- i) tempo de acesso à câmara da eclusa;
- ii) tempo de eclusagem, englobando os tempos de amarração, fechamento das comportas, enchimento (ou esgotamento) da câmara e abertura das comportas;
- iii) tempo de saída

2.1 Tempo de acesso

É o intervalo decorrido desde o instante em que a embarcação recebe ordens para se dirigir à eclusa, até o momento em que as portas podem ser fechadas, após a sua entrada na câmara. Este intervalo compreende os seguintes tempos:

- tempo de manobra T_M
- tempo de acesso curto T_{AC}

O tempo de manobra tem início quando a embarcação inicia a aproximação a partir do ponto de controle ou, caso este não existe, a partir da entrada do canal onde não pode haver cruzamento de embarcações, e termina junto à porta da eclusa. Fixadas as dimensões das embarcações, os tempos de manobra dependerão de:

- a- largura e comprimento do canal
- b- raio de curvatura mínima, fixado para embarcação em cruzamento em $R \geq 5L$, onde L é o comprimento da embarcação.
- c- folgas admissíveis entre embarcações ou obstáculos fixos, sendo recomendadas $F \geq 0,6B$, onde B é a boca da embarcação.
- d- velocidade média durante as manobras. Um aspecto relevante é a grande aceleração com que os motores podem trabalhar, exigindo pequena distância para acelerar, em virtude da pequena resistência da água em baixas velocidades, facilmente vencidas pela potência dos motores. Quando o comboio sai da garagem ou do ponto de controle em direção ao muro guia, ele parte da imobilidade, descreve uma trajetória e atinge o muro com uma velocidade bastante reduzida.

Dessa forma, adota-se geralmente uma velocidade média de 0,75m/seg para estas operações, significando que, em movimento contínuo, a embarcação não ultrapassa a velocidade de 1,5 m/s, o que é considerado razoável.

e- ângulo de aproximação do muro-guia, sendo recomendado um ângulo inferior a 10° , objetivando a redução do impacto da embarcação contra o muro-guia.

Portanto, para o cálculo de TM adota-se $TM = d_1 / 0,75$ onde d_1 é a distância a ser percorrida pela embarcação desde o ponto de controle até a porta da eclusa, com velocidade média de 0,75m/s.

O tempo de acesso curto é o intervalo de tempo decorrido desde o instante em que a porta da eclusa está aberta e a embarcação está alinhada ao muro-guia, prestes a entrar na câmara até o instante em que a porta fica liberada para o fechamento.

Geralmente, adota-se uma velocidade média de 0,5m/s dentro da câmara. Esta velocidade é baixa devido ao efeito de pistoamento e também para evitar choques violentos das embarcações com as portas ou paredes da eclusa.

Portanto, para o cálculo de TAC temos:

$TAC = d_2 / 0,5$, onde d_2 é o comprimento da câmara a ser percorrida com velocidade média de 0,5m/s.

2.2 Tempo de eclusagem

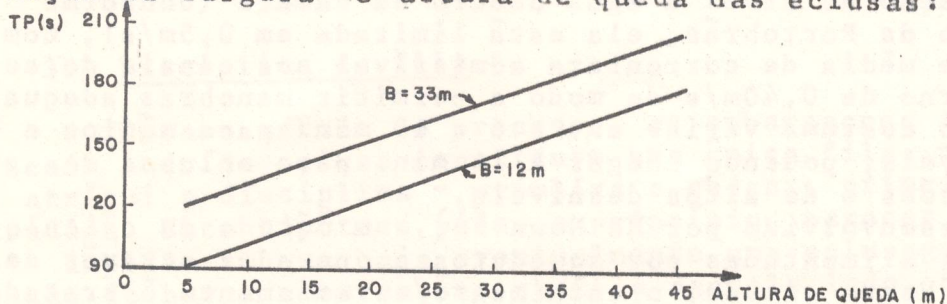
O tempo de eclusagem começa no momento do fechamento das portas, e termina no instante em que as portas estão totalmente abertas. Esse tempo compreende o tempo de arrumação e amarração das embarcações, fechamento da porta, assim como toda essa operação na saída, mais o tempo de enchimento ou esvaziamento da câmara, incluindo manobras de válvulas, equipamentos mecânicos e, eventualmente, a abertura parcial da porta para igualar os níveis.

Desta forma o tempo de enchimento que pode ser dividido em:

- Tempo de manobra de portas - TP
- Tempo de enchimento ou esvaziamento - TO

Os tempos requeridos para a manobra de porta dependem dos tipos e dimensões das portas que, por sua vez, são determinados pela altura de queda, vãos livres necessários à embarcação e variação sazonal dos níveis de água.

Os principais tipos de portas são elevadiças, abaixadiças, esporão ou buscavinicianas e o gráfico abaixo esquematiza a variação dos tempos de manobras para esses tipos de portas, em função da largura e altura de queda das eclusas:



Para uma estimativa de TP basta interpolar estas duas curvas em função da altura de queda e largura da eclusa.

Simultaneamente a estas operações são executadas a atracação e a desatracação da embarcação, colocação das defesas e para-choques, cujas durações são menores que as de fechamento e abertura das portas. Por esta razão, a duração das operações de atracação e desatracação não é computada.

A determinação dos parâmetros envolvidos nos processos de enchimento e esvaziamento da câmara constitui-se para a engenharia hidráulica, no principal problema de um projeto de eclusas de navegação.

A dificuldade principal é a conciliação entre dois objetivos conflitantes destes sistemas, quais sejam:

- a duração do enchimento e esvaziamento, que deve ser a menor possível, a fim de reduzir o tempo de eclusagem.
- as perturbações na câmara, oriundas do processo de enchimento e de esvaziamento, não devem provocar grandes esforços nas amarras das embarcações; portanto, as velocidades de enchimento e esvaziamento devem ser compatíveis com os esforços.

Dessa forma, o critério para o projeto hidráulico de uma eclusa deve se preocupar não só quanto aos aspectos de turbulência e dos esforços nas amarras, mas também quanto às condições de escoamento à montante e juzante, de pressões nas tubulações e dos tempos de enchimento e esvaziamento. Quanto aos últimos itens, de primordial importância para a navegação, devem ser, o quanto possível, reduzidos, na medida em que o aumento de custos gerados por esta condição, seja compatível com os benefícios decorrentes de uma operação bastante rápida da eclusa.

Basicamente, pode-se dizer que o tempo de enchimento e esvaziamento varia de acordo com o desnível, com as dimensões da câmara, com o sistema de enchimento e esvaziamento utilizado, com as perdas de carga nos aquedutos, com a velocidade de abertura das comportas, com a velocidade máxima admissível para a variação do nível d'água dentro da câmara (conforme de terminação da Portobrás, ela está limitada em 0,5m/s), com a velocidade média de correnteza admissível nos canais de acesso (em torno de 0,40m/s de modo a permitir manobras adequadas). Este tempo costuma variar entre 6 e 10 min. para médios e baixos desníveis, podendo chegar a 14 min. para eclusas de grandes dimensões e de altos desníveis.

Foi desenvolvido por Mc Nown (1), um método de cálculo para eclusas alimentadas por aquedutos e operadas através de válvulas. Neste estudo, o enchimento/esvaziamento é tratado de forma global e é feito uma estimativa de tempo total através da seguinte fórmula:

$$T_0 = \frac{A_e}{A_c} \sqrt{\frac{2kz_0}{g}} \quad (2.1)$$

- TO - tempo de enchimento ou esvaziamento
- k - fator que considera todas as perdas: perdas de inércia, de carga na válvula, de cargas localizadas na entrada, curvas, expansões de velocidade de fluxo, etc.
- z_0 - desnível
- Ae - secção horizontal da câmara da eclusa
- Ac - área do conduto de alimentação
- g - aceleração da gravidade

2.3 Tempo de saída

O tempo de saída é medido a partir do instante em que as portas estão abertas e a embarcação está pronta para sair, até o momento que a popa atinge o final do muro-guia.

Na saída da câmara, a inexistência de obstáculos reduz a restrição ao movimento, e o efeito de pistonamento se faz sentir com menos intensidade.

Geralmente adota-se uma velocidade média de saída em torno de 0,75m/s, que corresponde à velocidade máxima de 1,5m/s, considerada razoável e aceitável pela Portobrás.

Portanto para o cálculo de TS basta conhecer o comprimento do muro-guia (d_3); sendo esta distância percorrida com velocidade média de 0,75m/s, resulta

$$TS = d_3 / 0,75$$

3 - O Modelo de Fila para o Atendimento de Embarcações em uma eclusa

A passagem de uma embarcação (ou de um comboio) através de uma eclusa pode ser modelada por um processo de fila, pois a eclusa funciona como posto de prestação de serviço. Para caracterizar o modelo de fila, é necessário conhecer a distribuição de chegada das embarcações, a distribuição dos tempos de atendimento e a disciplina da fila.

3.1 Disciplina da fila

Para o estudo do processo, as embarcações em espera - de cada lado da eclusa constituem uma única fila, para a qual se atribui a disciplina - primeira a chegar, primeira a ser atendida. Esta hipótese pode, a princípio, parecer irrealista, pois implica em que haja eventualmente uma eclusagem em vazio, apesar de haver embarcações na fila daquele lado, para atender uma embarcação do outro lado que chegou antes.

Mas, como o objetivo é determinar os tempos médios de espera e ultrapassagem, não há conforme Gross and Harris (2) nenhuma falha em se adotar tal procedimento. (De fato, o cálculo das probabilidades de estado do sistema e a validade da fórmula de Little, relacionando o número médio de elementos e o tempo médio de permanência no sistema não dependem da disciplina de atendimento). Haverá uma modificação na distribuição do tempo de espera, mas não será alterado o primeiro momento da distribuição.

3.2 Tempo de atendimento

Em primeiro lugar, é necessário salientar que o tempo de atendimento precisa ser calculado para duas condições diferentes, conforme a embarcação seja atendida após uma eclusagem em vazio ou não. No caso em que não há eclusagem em vazio, o tempo de atendimento V_1 é dado por:

$$V_1 = TA + TE + TS \quad (3.1)$$

No caso em que há uma eclusagem em vazio, o tempo de atendimento V_2 é calculado pela seguinte relação:

$$V_2 = TAC + TE + TS + \max \{TM, TE\} \quad (3.2)$$

Na seção anterior, mostrou-se como estimar as diversas componentes do tempo de atendimento, na realidade, tendo em vista toda a aleatoriedade inerente ao processo, o que se estima é o tempo médio de atendimento (expectância do tempo de atendimento). Assim, além de valores para as expectâncias $E(V_1)$ e $E(V_2)$, seria necessário especificar também a forma e demais parâmetros da distribuição dos tempos de atendimento.

Na falta de dados para uma análise estatística que permitisse determinar a distribuição dos tempos de atendimento, decidiu-se escolher algumas funções mais apropriadas; neste artigo são apresentados resultados obtidos para distribuição normal.

3.3 Processo de chegada

Não há também dados disponíveis para análise do processo de chegada. A atitude mais confortável (para estudo do processo de fila) seria admitir que as chegadas de embarcações à eclusa fossem regidas por um processo de Poisson. Porém, para representar uma gama mais ampla de configurações, adotou-se uma família de funções de Erlang para representar a densidade de probabilidade dos intervalos entre chegadas consecutivas. (O processo de Poisson é uma das configurações cobertas pela Hipótese adotada). Com as hipóteses adotadas, a fila fica representada por um modelo G/G/1.

4 - Cálculo do Tempo Médio de Espera

O tempo médio de espera é determinado por meio de um processo analítico-numérico. O equacionamento analítico estabelece uma expressão para cálculo da distribuição probabilística dos tempos de espera da n -ésima embarcação que passa pela eclusa; a distribuição estacionária é obtida em um processo numérico iterativo.

4.1 Determinação da distribuição probabilística do tempo de espera

Sejam:

W_{n-1} o tempo de espera da embarcação $(n-1)$
(as embarcações são indexadas pela ordem de chegada à eclusa);

V_{n-1} o tempo de atendimento da embarcação $(n-1)$;

τ_n o intervalo entre as chegadas das embarcações $n-1$ e n

Então:

$$W_n = \begin{cases} W_{n-1} + V_{n-1} - \tau_n, & \text{se } \tau_n \leq W_{n-1} + V_{n-1} \\ 0, & \text{se } \tau_n > W_{n-1} + V_{n-1} \end{cases} \quad (4.1)$$

Seja: $H_n(w) = P[W_n \leq w]$

Adotando para V_{n-1} uma densidade de probabilidade genérica $g(.)$ e para τ_n uma densidade Erlang de ordem k , obtém-se a partir de (1):

$$H_n(w) = \int_0^\infty \left[\int_0^\infty \phi_k(\lambda(w_{n-1} - w + v_{n-1})) g(v_{n-1}) dv_{n-1} \right] dH_{n-1}(w_{n-1}) \quad (4.2)$$

onde

$$\phi_k(x) = e^{-x} \sum_{r=0}^{k-1} \frac{x^r}{r!} \quad (4.3)$$

A expressão (2) mostra como se determina a distribuição probabilística dos tempos de espera da n -ésima embarcação, $H_n(w)$, quando se conhece a correspondente distribuição para a embarcação $(n-1)$.

4.2 Determinação da distribuição estacionária

Se o índice de congestionamento, definido como

$$\rho = \frac{\text{Expectância do tempo de atendimento}}{\text{Expectância do intervalo entre chegadas consecutivas}}$$

for menor que 1, então a sequência de distribuições $H_n(w)$ converge para a distribuição estacionária $H(w)$. Assim, a expressão (2), com a substituição de $H_n(.)$ e $H_{n-1}(.)$ por $H(.)$, se transforma em uma equação integral para a determinação da distribuição estacionária:

$$H(w) = \int_0^\infty \left[\int_0^\infty \phi_k(\lambda(w_{n-1} - w + v_{n-1})g(v_{n-1})dv_{n-1} \right] dH(w_{n-1}) \quad (4.4)$$

Como não se consegue obter uma solução analítica para a equação (4), a distribuição estacionária é obtida através de um processo numérico iterativo (baseado no método das aproximações sucessivas), utilizando a relação (2) adotados inicialmente os valores da função $H_1(w)$, determina-se sucessivamente $H_2(w)$, $H_3(w)$..., até que, para um ϵ convenientemente selecionado:

$$|H_n(w) - H_{n-1}(w)| \leq \epsilon, \text{ para todo } w$$

satisfeita esta condição, aceita-se que $H_n(w) = H(w)$

A expectância do tempo de espera é obtida a seguir, mediante uma das relações abaixo:

$$E(W) = \int_0^\infty w dH(w) \quad (4.5)$$

$$E(W) = \int_0^\infty (1-H(w))dw \quad (4.6)$$

5 - Aplicação do Modelo para a Eclusa de Porto Primavera

O modelo foi utilizado para determinar o tempo médio junto à eclusa de Porto Primavera, no Rio Paraná, em diferentes condições de congestionamento. A qualidade dos resultados obtidos pela solução do modelo G/G/1 foi avaliada através de dois testes nesta seção.

5.1 Características geométricas da eclusa e estimativa

As características geométricas da eclusa de Porto Pri-

mavera mais relevantes para estimativa do tempo médio de transposição são as seguintes:

- | | |
|--|--------|
| - distância do ponto de controle até a porta da eclusa | - 430m |
| - comprimento do muro guia | - 100m |
| - comprimento de câmara da eclusa | - 210m |
| - largura da câmara da eclusa | - 17m |
| - diferença dos níveis de água | - 20m |
| - relação entre as áreas da câmara e dos condutos | - 297 |

Adotando o valor 1,10 para o fator de perda de carga, obtêm-se a partir das relações (3.1) e (3.2) e do que foi posto na seção 2, os seguintes resultados para o tempo médio de transposição, nas duas alternativas possíveis:

(i) $E(V_1) = 40,52$ minutos

(ii) $E(V_2) = 41,45$ minutos

5.2 Distribuições do tempo de atendimento e do intervalo entre chegadas consecutivas

Tendo em vista que a diferença entre as estimativas $E(V_1)$ e $E(V_2)$ é desprezível, decidiu-se considerar que o tempo de transposição de uma embarcação (ou comboio), seja ela precedida de uma eclusagem em vazio ou não, provém de uma mesma distribuição de probabilidade, com expectância

$$E(V) = 0,5(E(V_1) + E(V_2)).$$

Com relação à forma da distribuição, admitiu-se que o tempo de atendimento fosse uma variável aleatória normal (N), com pequeno coeficiente de variação, $\alpha = 0,15$.

Para o intervalo entre chegadas consecutivas, foram utilizadas funções densidades de probabilidade Erlang de ordem 1 (exponencial), 2 e 3. (E_1, E_2, E_3).

5.3 Resultados obtidos

A tabela 5.1 mostra os resultados obtidos para diferentes condições de operação, bem como os testes realizados para avaliar a qualidade dos mesmos. $E[W]$ é o tempo médio de espera (expectância do tempo de espera) das embarcações junto à eclusa, determinado pela solução numérica do modelo de fila G/G/1 e L é o número médio de embarcações (expectância do número de embarcações) no sistema, calculado pela fórmula de Little:

TABELA 5.1 - Tempo médio de espera e número médio de elementos no sistema

EXEMPLO	ÍNDICE DE CONGESTIONAMENTO	MODELO DE FITA	TEMPO MÉDIO NA FILA		NÚMERO MÉDIO DE ELEMENTOS NO SISTEMA	
			E[W] (min)	W' (min)	L	L'
1	0,3	$E_1/N/1$	9,1	9,6	0,36	0,37
2	0,4	$E_1/N/1$	14,2	15,0	0,54	0,55
3	0,5	$E_1/N/1$	21,1	22,4	0,75	0,77
4	0,6	$E_1/N/1$	32,0	33,5	1,07	1,09
5	0,7	$E_1/N/1$	49,4	52,1	1,54	1,59
6	0,5	$E_2/N/1$	7,8	7,3	0,60	0,59
7	0,6	$E_2/N/1$	12,9	12,1	0,79	0,77
8	0,7	$E_2/N/1$	21,7	20,1	1,07	1,04
9	0,8	$E_2/N/1$	39,0	37,8	1,55	1,54
10	0,6	$E_3/N/1$	7,3	6,7	0,71	0,70
11	0,7	$E_3/N/1$	13,1	12,3	0,92	0,91
12	0,8	$E_3/N/1$	25,2	22,4	1,29	1,24

$$L = \frac{\lambda}{k} [E(V) + E(W)]$$

onde λ e k são os parâmetros da distribuição Erlang que representa os intervalos entre chegadas consecutivas (L inclui as embarcações na fila e aquela que está sendo atendida).

Para avaliar a qualidade dos resultados obtidos, o tempo médio de espera e o número médio de embarcações no sistema são calculados por outro procedimento, surgindo daí os valores W' e L' que aparecem na tabela 5.1. Nos exemplos de 1 a 5 W' e L' são valores exatos calculados para o modelo M/G/1 pelas relações:

$$L' = \rho + \rho^2 (1 + \alpha^2) / 2(2 - \rho)$$

$$W' = (L' - \rho) / \lambda$$

Observa-se que, nesses 5 casos, os resultados obtidos pela solução analítico-numérica do modelo G/G/1 são apenas ligeiramente inferiores aos valores corretos; estes erros são mais pronunciados para o tempo médio de espera e, em termos percentuais, são poucos sensíveis ao crescimento do índice de congestionamento.

Para os demais exemplos, W' e L' são obtidos por simulação probabilística do processo de fila, utilizando o "package" GPSS. (W' e L' são também estimativas do tempo médio de espera e do número de embarcações no sistema, respectivamente). Mais uma vez, a análise comparativa atesta a boa qualidade dos resultados obtidos com o procedimento proposto. Cabe somente observar que os resultados determinados por simulação são sistematicamente inferiores aos calculados pelo processo analítico-numérico, ao contrário que acontece nos primeiros exemplos, onde os valores teóricos são maiores que aqueles obtidos pelo processo analítico-numérico.

BIBLIOGRAFIA

1. McNOWN, J.S. Fluid mechanics and lock design.
2. GROSS, D. & HARRIS, C.M. Fundamentals of queueing theory.