

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM SANEAMENTO,
MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS

OTIMIZAÇÃO DE LEIS DE MANOBRAS DE
COMPORTAS DE ECLUSAS DE NAVEGAÇÃO
COM USO DE ALGORITMO GENÉTICO

Denis Fürstenau Plec

Belo Horizonte

2010

**OTIMIZAÇÃO DE LEIS DE MANOBRAS DE
COMPORTAS DE ECLUSAS DE NAVEGAÇÃO COM
USO DE ALGORITMO GENÉTICO**

Denis Fürstenau Plec

Denis Fürstenau Plec

**OTIMIZAÇÃO DE LEIS DE MANOBRAS DE
COMPORTAS DE ECLUSAS DE NAVEGAÇÃO COM
USO DE ALGORITMO GENÉTICO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos.

Área de concentração: Recursos Hídricos

Linha de pesquisa: Modelagem Hidráulica

Orientador: Luiz Rafael Palmier

Belo Horizonte
Escola de Engenharia da UFMG

2010

Página com as assinaturas dos membros da banca examinadora, fornecida pelo Colegiado do Programa

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao único e verdadeiro Deus, que tem se mostrado fiel em todos os meus dias.

Agradeço à Elisa, que esteve sempre ao meu lado me dando forças e esperanças como namorada e agora como maravilhosa esposa.

Agradeço aos meus pais e irmãos, por acreditarem em mim.

Agradeço à igreja Lar Rede Palmares, por me acompanhar em bons e maus momentos.

Agradeço à Potamos Engenharia e Hidrologia, por investir em mim.

Agradeço ao meu orientador Luiz Rafael Palmier, pela oportunidade de participar do projeto de pesquisa e possibilitar grandes aprendizagens.

Agradeço a todos os meus amigos de São Paulo, Campinas e Belo Horizonte, por enriquecerem os meus dias.

Agradeço a Furnas Centrais Elétricas, pelo financiamento concedido ao projeto

RESUMO

O uso de modelagem matemática tem se mostrado de grande valia em várias áreas de pesquisa científica. Associada à modelagem física, a modelagem matemática possibilita uma ampla análise do comportamento hidráulico durante uma operação de enchimento e esvaziamento de eclusas de navegação, possibilitando, assim, um anteprojeto ou mesmo alteração em obras já existentes que resultam em leis de manobras com um melhor comportamento hidráulico, sem colocar em risco a estrutura física e as embarcações em trânsito. A metodologia do presente trabalho compõe-se basicamente em duas frentes. A primeira é a calibração de um modelo de simulação desenvolvido a partir das equações da posição, velocidade e aceleração do nível d'água na câmara de uma eclusa de navegação obtidas por meio da solução numérica da equação geral do escoamento no seu aqueduto. A calibração ocorreu, em um primeiro momento, comparando o desempenho do modelo utilizando a transformada de Laplace com a aplicação do método de Runge-Kutta de quarta ordem e, em um segundo momento, por meio da escolha dos coeficientes de perda de carga de uma eclusa com comparação dos resultados e os dados obtidos em um modelo físico construído no Laboratório de Hidráulica Experimental e Recursos Hídricos (LAHE/RJ) de Furnas Centrais Elétricas. A segunda frente do trabalho consiste no desenvolvimento de um modelo de otimização para manobras de eclusagem por meio de algoritmo genético, o qual foi aplicado e comparado com os resultados obtidos para a eclusa de Promissão, localizada no rio Tietê, em São Paulo, com a utilização do método de programação linear sequencial, também chamado de *Kelley's cutting plane method*. O modelo de otimização desenvolvido é melhor aplicável a eclusas que possuem o servo mecanismo de abertura e fechamento das comportas com um número limitado de velocidades de operação, pois o algoritmo genético possui a característica de limitar a um número finito de valores a variável do problema. Adicionalmente, no método as restrições inseridas não têm a necessidade de serem lineares, sendo possível a inserção de restrições não-lineares. Esse modelo também foi utilizado para obtenção da lei ótima de manobra para o modelo físico de eclusa do LAHE/RJ.

ABSTRACT

The use of mathematical modeling has been proved to be of a great value in many areas of scientific research. Associated with physical modeling, mathematical modeling enables a broad analysis of hydraulic behavior during a lock operation so that a pre-plan or even the alteration of locks that have been already constructed can result in gate operations with a better hydraulic behaviour, without jeopardizing the structures and ships in transit. The methodology of this research is composed by two fronts. The first front is the calibration of a simulation model that derives of the equations of position, velocity and acceleration of the water level inside a chamber of a lock obtained by Laplace transform in the general equation of the outflow in the lock's aqueduct. The calibration occurred, in a first moment, comparing the Laplace transform with the application of the method of Runge-Kutta in its forth order and, in a second moment, by choosing the coefficients of load loss of a lock and turned effective through the comparison of the results with the data obtained from the lock hydraulic model constructed in the Laboratório de Hidráulica Experimental e Recursos Hídricos (LAHE/RJ) of Furnas Centrais Elétricas. The second front of this research consists in developing an optimization model for valve operation of a lock through a genetic algorithm. The algorithm was applied and compared to the results obtained for the Promissão lock, situated on the Tietê river, in São Paulo, by using a model that based on the linear sequential programming or Kelley's cutting plane method. This algorithm is better applied in floodgates that have the system of opening and closing of the gates with a limited number of operation speeds because the genetic algorithm is characterized for limiting the problem's variable into a finite number of values. The biggest advantages of the utilization of the algorithm are the easy insertion of additional restrictions and the fact that they don't need to be linearized. This optimization model was also applied to the physical model available at the LAHE/RJ.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	X
LISTA DE TABELAS.....	XIII
LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS	XIV
LISTA DE NOTAÇÕES	XV
1 INTRODUÇÃO.....	1
2 OBJETIVOS.....	4
2.1 OBJETIVO GERAL	4
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	4
3 REVISÃO DA LITERATURA	5
3.1 ECLUSAS DE NAVEGAÇÃO	7
3.2 EQUACIONAMENTO HIDRÁULICO	15
3.3 MODELOS NUMÉRICOS DE SIMULAÇÃO	18
3.3.1 <i>Simulador Hidráulico de Enchimento e Esgotamento de Eclusas - LOCKSIM</i>	18
3.3.2 <i>Modelos SEEEC</i>	29
3.3.3 <i>Métodos de Runge-Kutta</i>	40
3.3.4 <i>Transformada de Laplace</i>	41
3.4 MODELOS NUMÉRICOS DE OTIMIZAÇÃO	43
3.4.1 <i>Kelley's cutting plane method</i>	44
3.4.2 <i>Colamussi, Desiderio e D'Amico</i>	49
3.4.3 <i>Natale e Savi</i>	53
3.4.4 <i>Algoritmos genéticos</i>	58
3.5 USO DE MODELOS FÍSICOS.....	67
3.5.1 <i>Eclusas do canal do Panamá</i>	72
3.5.2 <i>Modelo físico do LAHE</i>	77
4 METODOLOGIA	82
4.1 SIMULAÇÃO HIDRÁULICA.....	84
4.1.1 <i>Escolha do método numérico</i>	84
4.1.2 <i>Simulação para eclusa do LAHE</i>	87
4.2 ALGORITMO GENÉTICO EM ECLUSAGEM	99
4.2.1 <i>Parâmetros e variáveis do algoritmo genético</i>	99
4.2.2 <i>Definição das variáveis</i>	99
5 RESULTADOS	104
5.1 COMPARAÇÃO ENTRE OS MÉTODOS DE SIMULAÇÃO	104
5.2 CALIBRAÇÃO DO MODELO DE SIMULAÇÃO PARA A ECLUSA DO LAHE	106
5.3 COMPARAÇÃO ENTRE O MÉTODO CUTTING PLANE E O ALGORITMO GENÉTICO	112
5.4 APLICAÇÃO DO ALGORITMO GENÉTICO PARA O MODELO FÍSICO	121
6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	129
REFERÊNCIAS	132
APÊNDICE 1 – COMANDOS PARA MODELO DE SIMULAÇÃO COM O MÉTODO DE RUNGE-KUTTA DE 4ª ORDEM.....	137

APÊNDICE 2 – COMANDOS PARA MODELO DE SIMULAÇÃO COM A APLICAÇÃO DA TRANSFORMADA DE LAPLACE	142
APÊNDICE 3 – DADOS DE COEFICIENTES DE PERDA DE CARGA.....	146
APÊNDICE 4 – INTERFACE DE SIMULAÇÃO.....	148
APÊNDICE 5 – ENTRADAS DO MODELO DE SIMULAÇÃO	150
ANEXO 1 – RESULTADOS DOS ENSAIOS REALIZADOS POR COLAMUSSI <i>et al.</i>	153
ANEXO 2 – MODELO FÍSICO.....	155
ANEXO 3 – RESULTADOS DO MÉTODO <i>CUTTING PLANE</i> PARA OTIMIZAÇÃO	159

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 – Comparativo de capacidade de transporte de carga.....	6
Figura 3.2 – Hidrovias brasileiras.....	7
Figura 3.3 – Localização de eclusas no Brasil.....	8
Figura 3.4 – Esquema de transposição pelo enchimento da eclusa de Tucuruí.....	10
Figura 3.5 – Foto da eclusa Hiram M. Chittenden Locks com sistema de enchimento lateral.....	11
Figura 3.6 – Eclusas da hidrelétrica de Três Gargantas, na China.....	12
Figura 3.7 – Saída gráfica do modelo LOCKSIM para a eclusa de Wannabe.....	21
Figura 3.8 – Esquema representativo dos componentes do LOCKSIM.....	23
Figura 3.9 – Coeficiente de descarga para uma abertura relativa da comporta.....	29
Figura 3.10 – Esquema do sistema de enchimento e esgotamento utilizado no SEEEC-I.....	31
Figura 3.11 – Esquema do sistema de enchimento e esgotamento utilizado no SEEEC-II.....	33
Figura 3.12 – Esquema típico para sistema de enchimento com n orifícios.....	37
Figura 3.13 – Curvas características do enchimento utilizadas no modelo SEEEC-II.....	39
Figura 3.14 – Equações da aplicação do método de Runge-Kutta para eclusagem.....	41
Figura 3.15 – Lei de otimização para Promissão.....	48
Figura 3.16 – Evolução do nível para lei ótima para eclusa de Promissão.....	49
Figura 3.17 – Representação do modelo matemático para enchimento lateral de uma eclusa de navegação.....	50
Figura 3.18 – Nível da água medido e computado para a eclusa de Born.....	55
Figura 3.19 – Força de amarração medida e computada para a eclusa de Well.....	56
Figura 3.20 – Força de amarração medida em laboratório.....	58
Figura 3.21 – Representação esquemática de um indivíduo no algoritmo genético.....	60
Figura 3.22 – Representação do processo de cruzamento entre dois indivíduos em um algoritmo genético.....	63
Figura 3.23 – Representação do processo de cruzamento entre dois indivíduos no algoritmo genético.....	64
Figura 3.24 – Fluxograma geral do algoritmo genético.....	65
Figura 3.25 – Panorama do modelo físico da nova eclusa de Sevilha.....	69
Figura 3.26 – Ensaios em modelo do modelo físico da nova eclusa de Sevilha.....	70
Figura 3.27 – Planta do modelo físico de Jupιά.....	71
Figura 3.28 – Formação de vórtices junto à válvula.....	72
Figura 3.29 – Eclusas do projeto de ampliação do canal do Panamá.....	73
Figura 3.30 – Esquema aplicado ao LOCKSIM para simulação das novas eclusas do canal do Panamá.....	74
Figura 3.31 – Modelo 2D para otimização dos emboque dos canais.....	74
Figura 3.32 – Modelo 3D para estudo da geometria do canal de aproximação.....	75
Figura 3.33 – Modelo físico e esquema do novo sistema de eclusas do canal do Panamá.....	76
Figura 3.34 – a) Evolução do nível na câmara durante esgotamento. b) Hidrograma de vazão.....	77
Figura 3.35 – Modelo físico de eclusa do LAHE.....	79
Figura 3.36 – Comporta do tipo tainter do modelo físico.....	80
Figura 3.37 – Sistema de alimentação da câmara do modelo físico.....	80

Figura 4.1	– Coeficientes de perda de carga da comporta da eclusa de Promissão	86
Figura 4.2	– Coeficientes de contração na comporta da eclusa de Promissão	87
Figura 4.3	– Divisões do modelo físico para o regime de enchimento	90
Figura 4.4	– Equação de perda de carga para a comporta no regime de enchimento comparando com dados de literatura	92
Figura 4.5	– Leis de manobras utilizadas na simulação	97
Figura 4.6	– Contração do jato a jusante da comporta da eclusa do modelo do LAHE	98
Figura 4.7	– Exemplo de intervenção para geração de indivíduos fisicamente possíveis	100
Figura 4.8	– Exemplo de intervenção para caso em que a abertura total é obrigatoriedade para os indivíduos gerados	101
Figura 5.1	– Evolução do nível da água para a transformada de Laplace e Runge-Kutta	104
Figura 5.2	– Velocidade de subida do nível da água para transformada de Laplace e Runge-Kutta	105
Figura 5.3	– Aceleração de subida do nível da água para transformada de Laplace e Runge-Kutta	105
Figura 5.4	– Lei de abertura relativa utilizada para calibração do modelo de simulação	106
Figura 5.5	– Comparação das cotas do nível d'água na câmara da eclusa	108
Figura 5.6	– Comparação da velocidade de subida do nível d'água na câmara da eclusa	108
Figura 5.7	– Oscilação do nível de montante	109
Figura 5.8	– Inércia do nível da água ao final da manobra	109
Figura 5.9	– Comparação do nível d'água na câmara da eclusa	110
Figura 5.10	– Comparação da velocidade de subida da água na câmara da eclusa	110
Figura 5.11	– Comparação do nível da água na câmara da eclusa simulado e medido	111
Figura 5.12	– Comparação da velocidade de subida do nível da água na câmara da eclusa	111
Figura 5.13	– Sistema de enchimento e esgotamento da eclusa de Promissão em planta	113
Figura 5.14	– Sistema de enchimento e esgotamento da eclusa de Promissão	114
Figura 5.15	– Aberturas iniciais geradas pelo algoritmo genético	117
Figura 5.16	– Evolução da cota máxima alcançada por interação	118
Figura 5.17	– Evolução da cota do nível d'água para a lei ótima para $T = 1001,75s$	118
Figura 5.18	– Velocidade de subida do nível da água para a abertura otimizada	119
Figura 5.19	– Índice de cavitação da manobra otimizada e de cavitação crítica	120
Figura 5.20	– Aceleração da água para abertura otimizada	120
Figura 5.21	– Comparação da manobra otimizada utilizando o método <i>cutting plane</i> e o algoritmo genético	121
Figura 5.22	– Lei com máxima velocidade de abertura	123
Figura 5.23	– Perfil de velocidade para abertura de máxima velocidade	124
Figura 5.24	– Perfis de velocidades de subida do nível d'água	124
Figura 5.25	– Comparação das leis de manobras otimizadas	125
Figura 5.26	– Comparação da evolução do N.A.	125
Figura 5.27	– Comparação das leis de manobras otimizadas	126

Figura 5.28 – Comparação da evolução da velocidade de subida do N.A.	126
Figura 5.29 – Comparação da evolução do N.A.....	127
Figura 5.30 – Adaptação da lei ótima devido a limitações do servo-mecanismo.....	127
Figura 5.31 – Acréscimo do tempo da lei de abertura para o modelo físico.....	128

LISTA DE TABELAS

TABELA 3.1 – Comparativo entre variáveis consideradas pelo sistema LOCKSIM e modelo reduzido.....	19
TABELA 3.2 – Principais características do modelo físico	78
TABELA 4.1 – Coeficientes de perda de carga do trecho J para enchimento.	91
TABELA 4.2 – Coeficientes de perda de carga do trecho M para enchimento	93
TABELA 4.3 – Análise dos coeficientes de perda de carga do trecho J para enchimento.....	95
TABELA 4.4 – Análise dos coeficientes de perda de carga do trecho M para enchimento.....	95
TABELA 4.5 – Coeficientes finais de perda de carga.....	97
TABELA 5.1 – Condições iniciais da manobra	107

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

ANA – Agência Nacional de Águas

AHIMOR – Administração das Hidrovias da Amazônia Oriental

ASCE – *American Society of Civil Engineers*

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes

IPH – Instituto de Pesquisas Hidráulicas

LAHE – Laboratório de Hidráulica Experimental e Recursos Hídricos

PHE – Plano Hidroviário Estratégico

TVA – *Tennessee Valley Authority*

LISTA DE NOTAÇÕES

Maiúsculas Romanas

A = área de seção transversal

A_0 = área do aqueduto na seção de referência

A_1 = área transversal da seção a montante da comporta

A_2 = área transversal da seção a jusante da comporta

A_c = área da superfície da água na câmara da eclusa

A_h = área transversal do aqueduto

A_l = área da superfície da água na câmara

$A_c(i)$ = área do conduto na seção i

$A_p(i)$ = área do orifício i

C_a = coeficiente de massa adicional

C_d = coeficiente de descarga

C_f = coeficiente de fricção

C_h = coeficiente hidrodinâmico

C_p = coeficiente de pressão

C_r = número de Courant

C_v = coeficiente de descarga da comporta

C_θ = coeficiente de momento adicional

D = diâmetro hidráulico do aqueduto

F_a = força de amarração longitudinal

F = soma de forças externas na embarcação

H = carga hidráulica do aqueduto

H_0 = carga total na câmara da eclusa

H_c = carga inicial em cada orifício

H_d = carga piezométrica de jusante

H_u = carga piezométrica de montante

H_m = altura de inércia ou carga necessária para acelerar ou desacelerar o escoamento

H_s = altura da coluna de água no poço da comporta

I_θ = momento de inércia no eixo longitudinal

K = coeficiente de perda de carga

K_0 = tensão inicial da amarração
 K_1 = soma dos coeficientes de perda de carga a montante da comporta
 K_2 = soma dos coeficientes de perda de carga a jusante da comporta
 $K_{f,p,c}$ = coeficientes de perda de carga no conduto, pelo orifício e após o orifício
 $K_v(t)$ = coeficiente de perda de carga nas comportas
 K_{v0} = coeficiente de perda de carga no poço da comporta totalmente aberta
 L = comprimento da câmara da eclusa
 L_i = distância entre os pontos
 L_1 = comprimento do aqueduto de montante do sistema de enchimento
 L_2 = comprimento do aqueduto de jusante do sistema de enchimento
 M_s = massa da embarcação
 N = número de pontos em que a função é discretizada
 P = perímetro molhado
 $Q_c(i)$ = vazão no conduto na seção i
 R_{lam} = número de Reynolds laminar
 T_v = tempo de manobra da comporta
 T = tempo total de operação
 T_c^* = tempo ótimo de operação
 R^* = força de amarração máxima admitida
 S = área da câmara da eclusa
 S_1 = área da planta da primeira metade da câmara da eclusa
 S_f = atrito
 U = velocidade nos orifícios
 U_1 = velocidade vertical média na seção de entrada do poço da comporta
 U_1, U_2, \dots, U_m = velocidades nas bocas de tomada da água da câmara
 $V(t)$ = velocidade média do escoamento na seção de referência
 V_1, V_2, \dots, V_n = velocidades nas seções do aqueduto
 W = peso da embarcação
 Z_i = nível no ponto i da câmara
 Z_{t+1} = nível d'água na câmara no instante $t+1$
 Z_t = nível d'água na câmara no instante t
 Z_{ref} = nível d'água na câmara no instante t

Minúsculas Romanas

a = velocidade do pulso de pressão

$a_{1,2}$ = coeficientes experimentais para a perda de carga nos orifícios

$a_1, a_2, \dots a_n$ = áreas de cada boca de tomada d'água

b_l = largura da seção de escoamento

b_i = coeficiente de discretização do intervalo de tempo T no instante i

f = coeficiente de perda de carga de Darcy Weisbach

g = aceleração da gravidade

h = profundidade do escoamento

h_1 = perda de carga

k = constante k da amarração

$l_1, l_2, \dots l_n$ = cargas piezométricas entre cada boca de tomada da água

m_v = massa da embarcação

ne = número de dígitos que identifica a variável

p = pressão

p_v = pressão mínima na seção contraída do jato

p_{am} = pressão atmosférica local

p_w = pressão de vapor da água

r = comprimento do indivíduo

$r(t)$ = força de amarração no instante t

s = deslocamento rotacional na eixo transversal da embarcação

s_l = deslocamento da embarcação

t = tempo

v_v = velocidade do jato na seção contraída

v_{max} = máxima velocidade do servo mecanismo

vn = quantidade de variáveis de decisão

v = velocidade média do escoamento no aqueduto no instante t

x = posição no eixo horizontal no aqueduto

z'' = derivada segunda da posição do nível d'água na câmara, ou seja, aceleração

z' = derivada primeira da posição do nível d'água na câmara, ou seja, velocidade

z = posição do nível d'água na câmara

z_{res} = cota do nível de montante da eclusa, para o enchimento, e de jusante, para o esvaziamento

z'_{max} = velocidade máxima ascendente ou descendente

$\frac{d}{D}$ = grau de abertura relativa da comporta

$\frac{dh}{dt}$ = velocidade de saída do nível d'água na câmara

Letras Gregas

$\beta_1, \beta_2 \dots \beta_n$ = coeficientes individuais para cada seção do aqueduto

ε = rugosidade do conduto

Δt = espaçamento de tempo

Δx = espaçamento da coordenada longitudinal

θ = deslocamento rotacional no eixo longitudinal da embarcação

$\Theta_1, \Theta_2 \dots \Theta_n$ = coeficientes individuais para cada boca de tomada de água

μ = coeficiente de perda de carga

μ_0 = coeficiente de perda de carga no orifício para velocidade nula

ρ = massa específica

ν = viscosidade cinemática

ξ = coeficiente numérico para indicar enchimento (+1) ou esgotamento (-1) da câmara

$\sigma_{critico}$ = valor crítico do índice de cavitação

τ_o = coeficiente de cisalhamento

$\Phi(t)$ = termo relativo à perda de carga no escoamento

1 INTRODUÇÃO

A partir da segunda metade do século XX, o crescimento brasileiro tem sido resultado de um acelerado processo de industrialização e urbanização, gerando assim um consumo intensivo de recursos como água e energia. Historicamente, o setor elétrico tem sido priorizado como o principal agente do processo de gestão de recursos hídricos superficiais no Brasil, denotando uma assimetria na consideração do poder central em relação às demais categorias de usuários (FERNANDES & BURSZTYN, 2008).

Com a promulgação da Lei nº 9.433 (Brasil, 1997), no ano de 1997, inicia-se uma nova política brasileira para os recursos hídricos. Segundo essa lei, a gestão dos recursos hídricos deve ser descentralizada, contar com a participação do Poder Público, dos usuários e das comunidades e sempre proporcionar o uso múltiplo da água.

O princípio dos usos múltiplos, segundo Fernandez (2000), garante a todos os setores interessados o predomínio no uso da água ao que gerar os maiores benefícios sociais líquidos em todos os setores.

São diversos os usos para a água, destacando-se: abastecimento humano, irrigação agrícola, abastecimento industrial, recreação, turismo, pesca, navegação e hidroeletricidade.

A construção de usinas hidrelétricas, além de aumentar a geração energética, pode melhorar as condições de navegabilidade dos rios, tanto pela regularização de vazões como pela transformação de trechos de rios devido aos seus reservatórios. Entretanto, é necessário que, associadas às usinas e para que o país possa dispor de uma rede fluvial com adequadas características de navegabilidade, sejam construídas diversas outras obras de engenharia, como portos, sistemas de transposição, canalizações e eclusas de navegação.

A construção de barragens sem a inclusão de obras de transposição impossibilita a utilização contínua de rios que são navegáveis ou potencialmente navegáveis. Na navegação em reservatórios, as regras de operação devem ser definidas de tal modo que os níveis da água sejam garantidos para um transporte hídrico eficiente e seguro, o que pode gerar um conflito pelo uso da água entre a geração de energia e a navegação.

As intervenções hídricas resultantes do setor aquaviário correspondem à construção de eclusas, regularizações de vazões, canalizações, dragagem, derrocamento, dentre outras.

Embora o Brasil possua uma rede hidrográfica considerável, a navegação, como parte integrante de uma política pública de transportes, somente foi utilizada durante o período colonial (1500-1822) e do Império (1822-1889), ao contrário do que acontece nos países desenvolvidos, como Estados Unidos, França e Alemanha, que buscam aproveitar ao máximo seus rios e lagos (ANA, 2005).

A navegação fluvial no Brasil teve grande limitação ao longo do século XX por motivos econômicos e políticos. Principalmente a partir de 1956, favoreceu-se a construção de rodovias, concorrentes quanto ao transporte de cargas com os rios e as ferrovias, o que fez com que as ações governamentais direcionadas ao aproveitamento e desenvolvimento do transporte hidroviário fossem sempre menores, comparadas às implementadas em outros setores da infraestrutura.

Entretanto, espera-se para as próximas décadas um aumento dos investimentos por parte dos organismos públicos e privados com o intuito de tornar os produtos internos mais competitivos no mercado internacional por meio da redução do custo de seu transporte.

No presente trabalho foram desenvolvidos dois modelos matemáticos passíveis de uso em qualquer eclusa de navegação: o primeiro simula o comportamento hidráulico de uma eclusa de navegação dada uma lei de manobra das comportas do circuito de enchimento/esvaziamento, e o segundo, de caráter inovador pela aplicação de algoritmo genético, busca uma otimização das leis de abertura e fechamento das referidas comportas.

Para a utilização de métodos numéricos é de suma importância que o modelo esteja bem estruturado, modelando de forma correta o fenômeno físico. Para isso, o modelo precisa passar por uma importante fase de calibração, de forma a ser validado e utilizado de uma maneira segura e correta.

A calibração e verificação dos modelos foram possíveis tanto pela comparação de resultados obtidos em uma eclusa de Promissão, construída no rio Tietê, como por um modelo físico construído no Laboratório de Hidráulica Experimental e Recursos Hídricos (LAHE/RJ) de FURNAS Centrais Elétricas, no Rio de Janeiro.

Os modelos de otimização buscam uma melhoria nas leis de eclusagem, caracterizada pela diminuição do tempo de manobra para um determinado desnível inicial, sem, entretanto, deixar de atender restrições previamente estabelecidas.

A utilização de algoritmo genético possui a característica de restringir as possíveis velocidades de abertura e fechamento dos servos mecanismos a um número finito de velocidades. Portanto, o modelo possui uma melhor aplicação em eclusas em que os servomecanismos das comportas operam com valores discretos de velocidades.

A grande vantagem da utilização do modelo de otimização desenvolvido é a facilidade de inserção de novas restrições para as manobras de eclusagem, sejam elas representadas por equações lineares ou não-lineares, resultando em uma lei de manobra ótima, a qual, dentro desses critérios previamente definidos, resulta em uma manobra segura e eficaz.

O corpo da presente dissertação encontra-se dividido em 6 capítulos, sendo o primeiro o de introdução. No capítulo 2, são mencionados os objetivos geral e específicos. No capítulo 3, é apresentada a revisão da literatura, a qual contém os seguintes principais tópicos: (i) eclusas de navegação, (ii) equacionamento hidráulico, (iii) modelos numéricos de simulação, (iv) modelos numéricos de otimização e (v) uso de modelos reduzidos. No capítulo 4, são descritas as etapas metodológicas; no capítulo (5), é feita uma análise dos resultados; e, por último, no capítulo (6), são apresentadas as conclusões e recomendações para futuros trabalhos no tema.

2 OBJETIVOS

2.1 *Objetivo geral*

Analisar o comportamento hidráulico de sistemas de enchimento e esgotamento de eclusas de navegação por modelagem matemática buscando uma otimização da lei de abertura e fechamento de comportas utilizando algoritmo genético.

2.2 *Objetivos específicos*

- Simular diferentes operações de enchimento e esvaziamento para calibrar os coeficientes de perda de carga;
- Comparar os resultados de simulações de dois modelos numéricos de otimização, utilizando algoritmo genético e o método de programação linear sequencial;
- Comparar os resultados obtidos pelo algoritmo genético com os de um modelo físico; e
- Otimizar e validar operações de enchimento de um modelo físico de eclusa.

3 REVISÃO DA LITERATURA

O Brasil possui um grande potencial hidrelétrico devido às características de sua densa rede fluvial hidrográfica. Segundo Neutzling (2004), o Brasil possui 13,8% do volume de água doce do mundo, sendo que 70% desse volume está localizado na região Amazônica, com um escoamento total estimado de 3845,5 km³/ano.

Para se transportar uma tonelada de carga útil por um quilômetro, consomem-se em média seis vezes mais combustível por rodovia do que por hidrovias (ROSA, 2005). Uma das únicas desvantagens do transporte por hidrovias é o fator tempo, que pode diminuir em muito a competitividade das hidrovias. Por isso, é necessário analisar as características de cada hidrovias para que se possa maximizar as condições de utilização das mesmas e avaliar os produtos transportados. Normalmente, aqueles com baixo valor agregado e peso bruto alto deveriam ser transportados por hidrovias. Assim, o principal argumento em favor das hidrovias está no custo do transporte, quando comparado a outros meios de transporte de cargas.

Segundo Santos (1993), o Brasil se defronta com sérias limitações de expansão de fronteiras agrícolas, dada a insuficiência de corredores ferro-hidroviários. A maioria dos atuais projetos de indução ao desenvolvimento em áreas de expansão de fronteira agrícolas e minerais é de pavimentação ou de reconstrução de rodovias. Entretanto, segundo Perrupato (2009), Secretário de Políticas Nacionais de Transportes na atual data, a meta do Ministério dos Transportes de modificar a matriz de transportes nas próximas duas décadas dará prioridade a hidrovias com o desenvolvimento do Plano Hidroviário Estratégico (PHE).

Na Figura 3.1 é representada uma comparação da capacidade de transporte de carga entre as vias fluvial, férrea e rodoviária. A base de cálculo utilizada para a capacidade de transporte foi:

- **Barcaça:** 1.500 toneladas;
- **Comboio:** 15 barcaças, totalizando 22.500 toneladas;
- **Vagão de trem:** 100 toneladas; e
- **Carreta:** 26 toneladas.

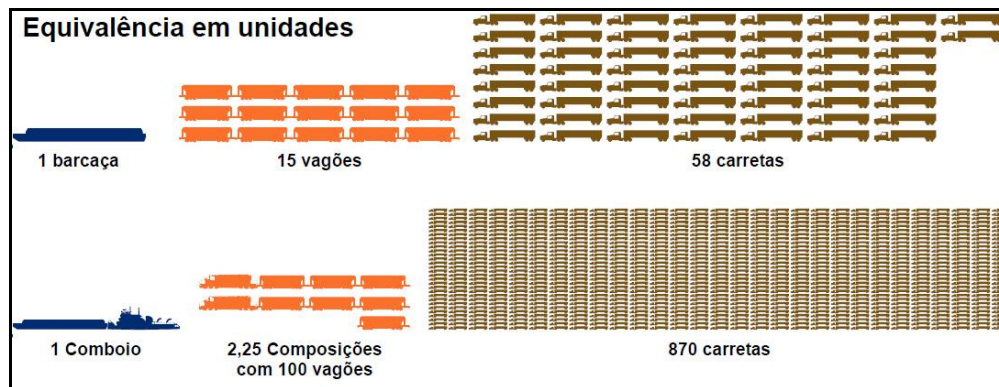


Figura 3.1 – Comparativo de capacidade de transporte de carga
 Fonte: Adaptado de Rosa (2005)

Segundo o site oficial do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) – acesso em setembro de 2010 –, é de suma importância o desenvolvimento do transporte hidroviário, pois:

“Dentro da política de interiorização dos transportes, traçada pelo Governo Federal, é prioridade a exploração da potencialidade do transporte hidroviário, que possui vasta extensão de vias navegáveis, cerca de 42.000 km. É imperioso, nos dias de hoje, mediante o acelerado processo de globalização da economia mundial, a re-adequação do sistema de transportes para a obtenção de redução de custos. Por suas características de transporte para grandes volumes e grandes distâncias, o sistema hidroviário agrega a preservação ambiental e custos inferiores aos demais modais.”

Segundo o Ministério dos Transportes (2004), as principais hidrovias do Brasil são:

- Hidrovia do Madeira;
- Hidrovia do São Francisco;
- Hidrovia Tocantins-Araguaia;
- Hidrovia Paraná-Tietê; e
- Hidrovia Paraguai-Paraná.

Na Figura 3.2 estão representadas as principais vias navegáveis no Brasil segundo o Plano Nacional de Viação (ROSA, 2005), estabelecido em 10/09/1973 e revisado em 16/04/1979.

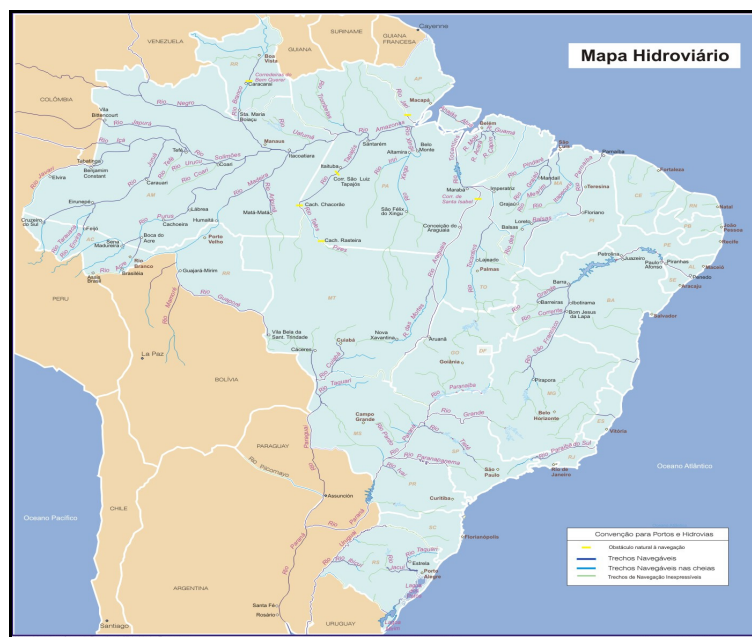


Figura 3.2 – Hidrovias brasileiras
 Fonte: Adaptado de Rosa (2005)

A rede hidrográfica brasileira efetivamente considerada pelo Ministério dos Transportes possui uma extensão de 26.662 km, entretanto o Brasil utiliza de fato apenas cerca de 10.000 km de vias navegáveis para o transporte de cargas. Se forem incluídos os trechos de rios navegáveis apenas nas cheias e os potencialmente navegáveis, ou seja, aqueles que podem adquirir boas condições de navegabilidade após a execução de melhorias, a rede hidroviária brasileira pode ultrapassar a extensão de 40.000 km.

Vale ressaltar que cada rio da rede hidroviária brasileira oferece condições bem diferentes de navegabilidade no que diz respeito ao calado, largura da rota de navegação, raios das curvas presentes, presença de corredeiras, cachoeiras, barragens e eclusas, bem como às variações decorrentes do ciclo hidrológico.

3.1 Eclusas de navegação

As eclusas de navegação são instalações para transposição de embarcações entre dois níveis diferentes de água, permitindo uma continuidade do trecho de navegação fluvial. As eclusas são constituídas basicamente por uma câmara suficientemente espaçosa para conter uma ou várias embarcações, portas nas extremidades frontais e um sistema para encher e esvaziar a água no interior da câmara.

Na Figura 3.3 são apresentadas as localizações das eclusas no território brasileiro.



Figura 3.3 – Localização de eclusas no Brasil

Fonte: Ministério dos Transportes, disponível em www.transportes.gov.br/bit/hidro/hidro, acesso jun.2010

Segundo Kolosov (2002), a Rússia possui 134 eclusas financiadas pelo Departamento de Águas e Navegação desse país. O Brasil, assim como a Rússia, também é um país de grande área territorial, entretanto possui, segundo o Ministério dos Transportes (2010), apenas 18 eclusas, sendo ainda duas delas em projeto.

Segue a lista das eclusas brasileiras subdivididas por regiões geográficas:

Região Norte:

- Eclusa de Tucuruí (PA).

Região Nordeste:

- Eclusa de Sobradinho (BA);
- Eclusa de Boa Esperança (PI); e
- Projeto Eclusa de Serra Quebrada (MA);

Região Sudeste:

- Eclusa de Barra Bonita (SP);
- Eclusa de Bariri (SP);

- Eclusa de Ibitinga (SP);
- Eclusa de Promissão (SP);
- Eclusa de Nova Avanhandava (SP);
- Eclusa de Três Irmãos (SP);
- Eclusa de Ilha Solteira (SP);
- Eclusa de Jupiaá (SP);
- Eclusa de Porto Primavera (PR); e
- Projeto Eclusa de Itaipu.

Região Sul:

- Eclusa de Amarópolis (RS);
- Eclusa de Anel de Dom Marco (RS);
- Eclusa de Bom Retiro (RS); e
- Eclusa de Fandango (RS).

A função de uma eclusa de navegação é permitir a transposição do desnível por qualquer tipo de embarcação, tanto particular como transportadora de carga. A transposição deve ser realizada de maneira rápida, com o intuito de minimizar os custos de transporte dos produtos, mas também de maneira segura, evitando situações que coloquem em risco as embarcações e seus passageiros.

Na Figura 3.4 ilustra-se esquematicamente o funcionamento da eclusa de Tucuruí para a transposição do rio Tocantins, partindo de um nível mais baixo para um nível superior, vencendo um desnível total de 72 metros. Por manobras de enchimento da câmara de navegação a embarcação consegue transpor de um nível inferior para um superior através de duas eclusas sequenciais separadas por um canal intermediário de 5,5 km de extensão e largura mínima de 140,0 metros.

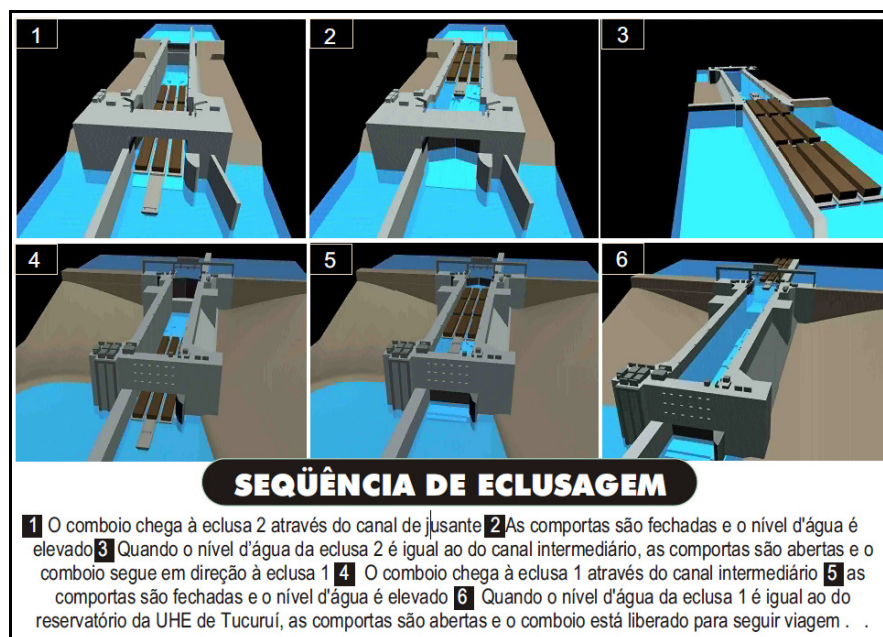


Figura 3.4 – Esquema de transposição pelo enchimento da eclusa de Tucuruí
 Fonte: Administração das Hidrovias da Amazônia Oriental – AHIMOR (2005)

As eclusas são basicamente caracterizadas quanto ao tamanho do desnível que a estrutura hidráulica possibilita transpor. A queda de uma eclusa é a diferença entre os níveis de água de montante e de jusante. Dessa forma, são classificadas em eclusas de baixíssima, baixa, média, alta e altíssima queda. Porém, o valor da queda hidráulica não define a concepção do funcionamento, pois por um longo período podem ocorrer variações no valor da queda devido ao regime fluvial. Um sistema hidráulico corretamente projetado considerará todas as quedas possíveis, suas permanências, suas probabilidades e seus tempos de operação cabíveis.

As eclusas de baixa queda, ainda encontradas em sua grande maioria na Europa, possuem sistemas mais simples, com a maioria das operações de adução/esgotamento sendo realizadas pelas extremidades. Os sistemas sofisticados, de alimentação pelo fundo da câmara, são próprios de eclusas de alta queda. Para as de queda intermediária se tem a opção de sistemas de enchimento e esgotamento pelas extremidades e por condutos que se distribuem ao longo da câmara pelos muros laterais. Na Figura 3.5 é apresentada uma foto de uma eclusa com enchimento lateral.



Figura 3.5 – Foto da eclusa Hiram M. Chittenden Locks com sistema de enchimento lateral
Fonte: Swedes (2009)

A classificação das quedas depende de conceitos de técnica de execução local, possuindo uma variação entre algumas regiões. Porém, a *American Society of Civil Engineers* (ASCE, 1998) utiliza a seguinte classificação: eclusas de baixíssima queda para desníveis de até 10 pés (3,05 m); eclusas de baixa queda para desníveis entre 10 e 40 pés (12,2 m); eclusas de alta queda para desníveis entre 40 e 100 pés (30,5 m); e eclusas de altíssima queda para desníveis acima de 100 pés.

- Eclusas de baixíssima queda

Para este tipo de eclusa podem ser encontrados muitos casos onde o enchimento é feito de forma frontal, por duas folhas verticais ou por porta basculante, de acionamento vertical.

- Eclusas de baixa queda

Para estas eclusas podem ser encontrados muitos casos onde o enchimento é feito por sistemas de portas laterais. A distribuição das portas ou de *manifolds* ao longo da câmara é objeto de vários estudos de modelos reduzidos com o objetivo principal da diminuição de ondas estacionárias e uma baixa turbulência local dos jatos.

- Eclusas de alta queda

Câmaras de altas quedas podem ser necessárias em situações específicas de navegação, em geral em trechos de rios com declive acentuado ou em ligações entre bacias. O caso que é comum no Brasil é a situação de eclusas projetadas para múltiplos usos, onde prevalece o

interesse da geração de energia hidrelétrica, que exige alturas significativas para uma maior geração de carga de produção.

- Eclusas de altíssima queda

Como exemplo se pode citar o caso das eclusas da barragem de Três Gargantas, na China, onde um desnível de 120,0 m é vencido por dois conjuntos paralelos de 5 eclusas em linha. Na Figura 3.6 é apresentada uma foto dessas eclusas.

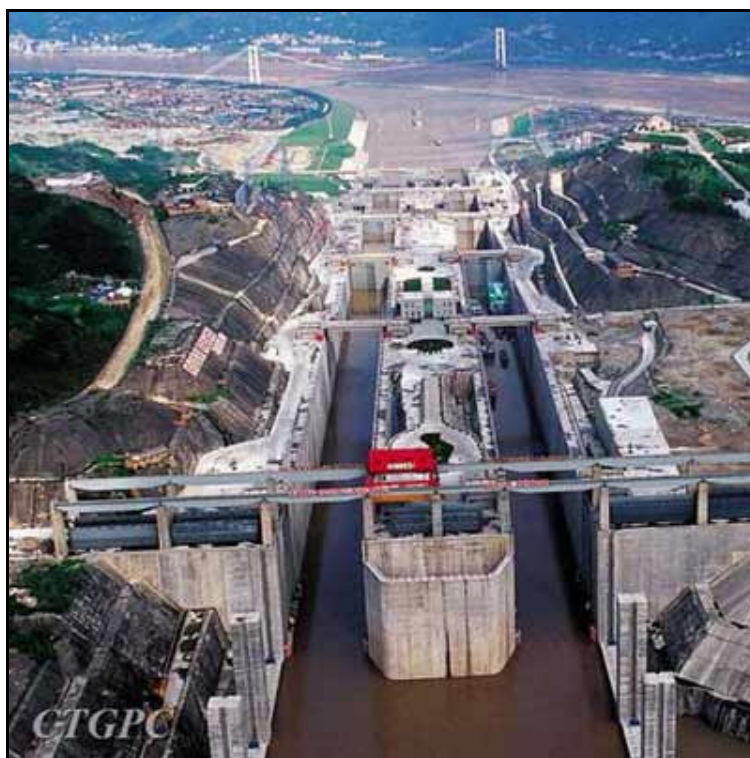


Figura 3.6 – Eclusas da hidrelétrica de Três Gargantas, na China
Fonte: CTGPC (2002)

A implantação de uma eclusa de navegação normalmente não exige obras de difícil execução e não tem um custo excessivo. As maiores dificuldades existentes do ponto de vista técnico para implantação das eclusas encontram-se no seu dimensionamento e na garantia da sua eficiência, ainda na fase de projeto.

Em eclusas em operação os principais problemas relacionados com as leis de manobras das comportas são:

- Segurança das embarcações:

A segurança das embarcações em trânsito em uma eclusa pode ser traduzida, de forma objetiva, em termos dos riscos de colisões e de danificação dos materiais transportados e das embarcações.

O principal motivo de colisões é o excessivo esforço na amarração causado por ondas da água no interior das câmaras de navegação, cujas consequências são o movimento da embarcação e o potencial risco de colisão.

Os critérios limites para o esforço de amarração variam largamente de país para país. Nos E.U.A., por exemplo, o esforço máximo permitido é de 5 toneladas. Já no Brasil, a Petrobras estabeleceu o critério de 1/600 da tonelada bruta da embarcação (TONDOWSKI, 1987).

Os esforços nas amarrações são proporcionados pelas perturbações da água decorrentes da alimentação irregular de água das tubulações, ocasionando uma má distribuição de vazão. O estágio mais crítico, quanto à amplitude de oscilação da superfície da água, é no início da operação, quando a quantidade de água dentro da câmara, no caso do enchimento da câmara de navegação, é menor e a velocidade da água é maior devido a pequenos valores de abertura das comportas e às maiores diferenças de desnível entre jusante e montante.

- Efeitos de cavitação:

A cavitação é um dos principais problemas encontrados nas eclusas, limitando principalmente o aumento de altura das eclusas.

A cavitação é o fenômeno de vaporização de um líquido devido à baixa pressão durante o seu movimento. Pelo teorema de Bernoulli, um líquido ao ser acelerado, tem uma redução de pressão para que a sua energia mecânica se mantenha constante.

A cavitação ocorre quando é atingida a pressão de vapor na região, formando-se núcleos gasosos que, mantida a condição de pressão, podem resultar em cavidades de vapor.

Essas cavidades, caso a pressão local fique próxima do valor da pressão de vapor, tendem a aumentar em volume, podendo ocorrer seu rompimento repentino. Se a pressão na tubulação alcançar valores acima da pressão de vapor, as bolhas se tornarão instáveis e implodirão,

causando muitas vezes estrondos com ruídos e eventuais danos à tubulação e aos demais componentes dos circuitos hidráulicos.

Na engenharia hidráulica a cavitação é tida como um fenômeno dos mais complexos, seja pelo seu entendimento, seja pelos diversos parâmetros que a influenciam e pela grande dificuldade de fazer sua simulação em laboratório.

Há dois tipos de cavitação: gasosa e vaporosa. A cavitação gasosa ocorre quando há grande quantidade de gases suspensos na água, sendo potencializada quando o processo de cavitação é suficientemente lento, permitindo o aumento da quantidade de ar no líquido em função de sua gaseificação. Devido a esse aumento gradativo de volume de ar os rompimentos das bolhas acontecem de forma mais lenta, fazendo com que a cavitação gasosa não seja tão agressiva.

A cavitação vaporosa ocorre quando há pouco ar no interior do fluxo de água e no interior das bolhas há somente o vapor. Nesse caso, as pressões geradas pelo rompimento das bolhas são elevadas, causando danos às estruturas hidráulicas, tais como: ruídos, vibrações, flutuações de pressão, erosão e perda de eficiência hidráulica.

O aumento da queda de projeto das eclusas implica em pressões cada vez mais baixas a jusante das válvulas. O problema de cavitação ocorre basicamente nas eclusas de médio e alto desnível, sendo intimamente ligada às altas velocidades de escoamento e às baixas pressões a jusante das comportas, e à recirculação do fluxo sobre o ressalto afogado que se forma.

A solução que em primeiro lugar se visualiza é baixar as cotas de implantação das válvulas, posicionando-as sob pressão estaticamente mais elevada, dificultando que a pressão alcance valores próximos ao valor de pressão de vapor do líquido, solução essa que normalmente é refutada devido aos aumentos dos custos de implantação da obra.

Outra medida para a minimização da cavitação consiste na aeração controlada das zonas críticas de baixa pressão. A saturação de ar impede a formação de bolhas de vapor, ocorrendo apenas a cavitação gasosa, sendo essa de menor impacto, reduzindo consideravelmente os danos causados pela cavitação.

É possível, dentro de certos limites, evitar problemas de cavitação por meio de um correto dimensionamento das válvulas e tubulações, ocasionando um circuito hidráulico de maior durabilidade, e pela adoção de leis de manobras mais adequadas das comportas dos circuitos de enchimento e esvaziamento das eclusas.

- Limitação do servo mecanismo:

Os servo-mecanismos das comportas das eclusas de navegação são responsáveis pelo controle de vazão nos circuitos de enchimento e esvaziamento da eclusa. Eles devem permitir a aplicação da operação de manobra. Logicamente, existe um limite físico do servo mecanismo, associado a uma velocidade máxima de abertura e fechamento ou até a um número limitado de movimentos a algumas velocidades, impossibilitando muitas vezes a utilização de leis de manobras mais eficientes.

- Força nas amarrações:

A perturbação da água no interior da câmara da eclusa provoca esforços adicionais nos cabos de amarração. Quando esses rompem, podem ocorrer colisões da embarcação contra as portas e paredes da câmara, causando grandes prejuízos.

A evolução dos sistemas de enchimento e esgotamento das câmaras de eclusas tem como um dos objetivos centrais a garantia de uma uniformidade da lâmina de água dentro da câmara, buscando assim uma maior segurança para as embarcações durante as manobras de eclusagem.

3.2 Equacionamento hidráulico

Os processos de transferência de calor e o escoamento de fluidos estão em muitos aspectos relacionados com aspectos cotidianos de sociedades humanas, sendo exemplos de ocorrência de tais fenômenos a dissipação de poluição na natureza, as tempestades, o escoamento da água e a temperatura do corpo humano.

Patankar (1980), dando grande importância a esses processos físicos, afirma que:

“Como esses processos físicos influenciam as vidas humanas, nós devemos ser capazes de lidarmos com eles de uma maneira eficiente. Essa habilidade resultará de uma compreensão profunda dos processos da natureza e da metodologia para prevê-los quantitativamente.”

Uma correta compreensão do processo físico permite uma correta predição e possibilita uma maior eficiência do processo e uma melhor adaptação para com os citados fenômenos. A predição pode oferecer benefícios econômicos e contribuir para o desenvolvimento do homem.

O escoamento nos circuitos de uma eclusa, tanto para as etapas de enchimento como de esgotamento, desenvolve-se em regime transitório. As equações básicas para os escoamentos transitórios em condutos forçados para o caso geral são demonstradas pelas equações de movimento e da continuidade, conforme indicado a seguir em forma unidimensional:

- Equação de movimento

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + v \frac{\partial Q}{\partial x} + gA_h \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{f}{2DA_h} Q|Q| = 0 \quad (3.1)$$

- Equação da continuidade

$$A_h \frac{\partial H}{\partial t} + Q \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{a^2}{g} \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (3.2)$$

na qual:

Q = vazão do escoamento no instante t

v = velocidade média do escoamento no aqueduto no instante t

x = posição no eixo horizontal no aqueduto

g = aceleração da gravidade

A_h = área transversal do aqueduto

H = carga hidráulica do aqueduto

f = coeficiente de perda de carga de Darcy Weisbach

D = diâmetro hidráulico do aqueduto

a = velocidade do pulso de pressão

Admitindo-se que o fluido pelo escoamento analisado seja incompressível e que o conduto possua paredes rígidas, admite-se que qualquer perturbação nas condições de escoamento seja assumida instantaneamente por todo o fluido. Assim:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \Rightarrow \frac{\partial Q}{\partial t} = \dot{Q} \text{ e } a \rightarrow \infty \quad (3.3)$$

Partindo-se das equações 3.1 a 3.3, é obtida a seguinte equação diferencial geral, que representa o escoamento nos aquedutos de uma eclusa:

$$z'' + (\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_v(t))\omega^2 A_c^2 z' |z'| + \omega^2 z - \omega^2 z_{res} = 0 \quad (3.4)$$

na qual:

$$\frac{1}{\omega^2} = \frac{L_1 A_c}{g A_1} + \frac{L_2 A_c}{g A_2}$$

$$\alpha_1 = \frac{K_1}{2gA_1^2}$$

$$\alpha_2 = \frac{K_2}{2gA_2^2}$$

$$\alpha_v(t) = \frac{K_v(t)}{2gA_1^2}$$

sendo:

z'' = derivada segunda da posição do nível da água na câmara, ou seja, aceleração

z' = derivada primeira da posição do nível da água na câmara, ou seja, velocidade

z = posição do nível da água na câmara

K_1 = soma dos coeficientes de perda de carga a montante da comporta

K_2 = soma dos coeficientes de perda de carga a jusante da comporta

K_v = coeficiente de perda de carga na comporta do sistema de enchimento

A_1 = área transversal da seção a montante da comporta

A_2 = área transversal da seção a jusante da comporta

A_c = área da superfície da água na câmara da eclusa

L_1 = comprimento do aqueduto de montante do sistema de enchimento

L_2 = comprimento do aqueduto de jusante do sistema de enchimento

z_{res} = cota do nível de montante da eclusa, para o enchimento, e de jusante, para o esvaziamento.

3.3 Modelos numéricos de simulação

A equação geral (Eq. 3.4) que representa o escoamento na eclusa de navegação é uma equação diferencial homogênea de segunda ordem que não possui uma solução analítica. Logo, para a obtenção de sua solução é necessária a utilização de algum método numérico.

Alguns modelos matemáticos já foram desenvolvidos para simular o comportamento hidráulico durante manobras de enchimento e esgotamento nas câmaras de eclusas.

3.3.1 Simulador Hidráulico de Enchimento e Esgotamento de Eclusas - LOCKSIM

O simulador LOCKSIM é um modelo numérico desenvolvido pela TVA (*Tennessee Valley Authority*), utilizado para simulação uni-dimensional de eclusas de navegação para enchimento e esvaziamento. No LOCKSIM, o sistema de enchimento e esvaziamento é representado por um circuito fechado e seções de um canal natural a montante e jusante da eclusa, englobando, assim, velocidades de aproximação e de saída ao sistema.

A geometria, as características hidráulicas e as condições de contorno do sistema são descritas em um arquivo de *input* (entrada) em formato ASCII, que é lido pelo LOCKSIM no início de cada simulação. O simulador do LOCKSIM permite uma grande interatividade entre as simulações, permitindo ao usuário examinar os resultados, mudar parâmetros e decidir em continuar ou não o processo em qualquer instante de tempo durante a sua execução.

O simulador LOCKSIM é apto para estimar a força de amarração longitudinal na câmara, o índice de cavitação e pressões mínimas a jusante das comportas, considerando um rigoroso tratamento para o sistema de enchimento ou esvaziamento com diversos pontos de alimentação da vazão. Na Tabela 3.1 é apresentada uma comparação dos fatores que são considerados no sistema do LOCKSIM com um modelo reduzido na escala de 1:25.

Tabela 3.1 – Comparativo entre variáveis consideradas pelo sistema LOCKSIM e modelo reduzido

Parâmetros hidráulicos	LOCKSIM (Modelo 1-D)	Modelo físico 1:25
CÂMARA DE NAVEGAÇÃO		
Tempo de enchimento e esvaziamento	X	X
Turbulência da superfície da água		X
Força de amarração longitudinal	X	X
Força de amarração transversal		X
CONDUTO		
Pressão	X	X
Descarga	X	X
Bolhas de ar		X
COMPORTA		
Potencial de cavitação	X	X
Entrada de ar	X	X
Vibrações	X	X
SEÇÕES DE APROXIMAÇÃO		
Velocidade de aproximação	X	X
Vórtices		X
Correnteza		X
SEÇÕES DE DISSIPAÇÃO		
Velocidades de dissipação	X	X
Correnteza		X
Ondas		X

A Tabela 3.1 sugere que o LOCKSIM é uma ferramenta complementar e não auto-suficiente para estudos de enchimento e esvaziamento de eclusas. É evidente a necessidade de um modelo em escala reduzida, entretanto o custo de experimentos no modelo reduzido é muito elevado. Modelos matemáticos auxiliam na elaboração de um pré-projeto de dimensionamento, evitando intervenções estruturais após a construção do modelo físico, devido a problemas hidráulicos.

3.3.1.1 Breve histórico do desenvolvimento do LOCKSIM

A origem do LOCKSIM é um código de computador escrito por Shoohl, em meados de 1980, com o intuito de aplicar no estudo do golpe de aríete. O código foi aplicado pela primeira vez em eclusas em 1989, quando foi usado para o estudo de uma condição transiente na eclusa de Wheeler, pela TVA.

Em 1992, o código foi nomeado por TFSIM e escrito na linguagem C. O TFSIM é um código computacional para simulação de transientes hidráulicos que permite uma condição de diferentes combinações de fluxos, em sistemas com bifurcações e válvulas de alimentação em condutos fechados (SCHOHL *et al.*, 1995).

O código fonte foi adaptado para simular em um mesmo sistema tanto um canal aberto como condutos fechados. Com essa capacidade, é possível simular manobras nas eclusas de navegação com um sistema composto por um trecho de leito natural e uma câmara de eclusagem. Outra grande vantagem do simulador é a capacidade de considerar diferentes pontos de alimentação para a câmara de navegação por meio de várias entradas e saídas de água e, portanto, de estimar a força longitudinal durante uma manobra de enchimento e esvaziamento obtida por diferentes valores de níveis de água na câmara da eclusa. Suas aplicações foram realizadas para diferentes sistemas de enchimento, com alimentação lateral, como, por exemplo, nas eclusas de Uniontown e Myers, e alimentação central, como, por exemplo, em na eclusa de McAlpine.

Na Figura 3.7 estão os resultados para a aplicação do LOCKSIM para a eclusa de Wannabe com uma lei de esvaziamento com 90 segundos de abertura total. Essa eclusa possui 205,74 metros de comprimento por 33,52 metros de largura e um desnível máximo de 19,80 metros. Estão representados a lei de abertura, o gradiente piezométrico, a descarga total, o índice de cavitação e a força de amarração estimada para a manobra simulada.

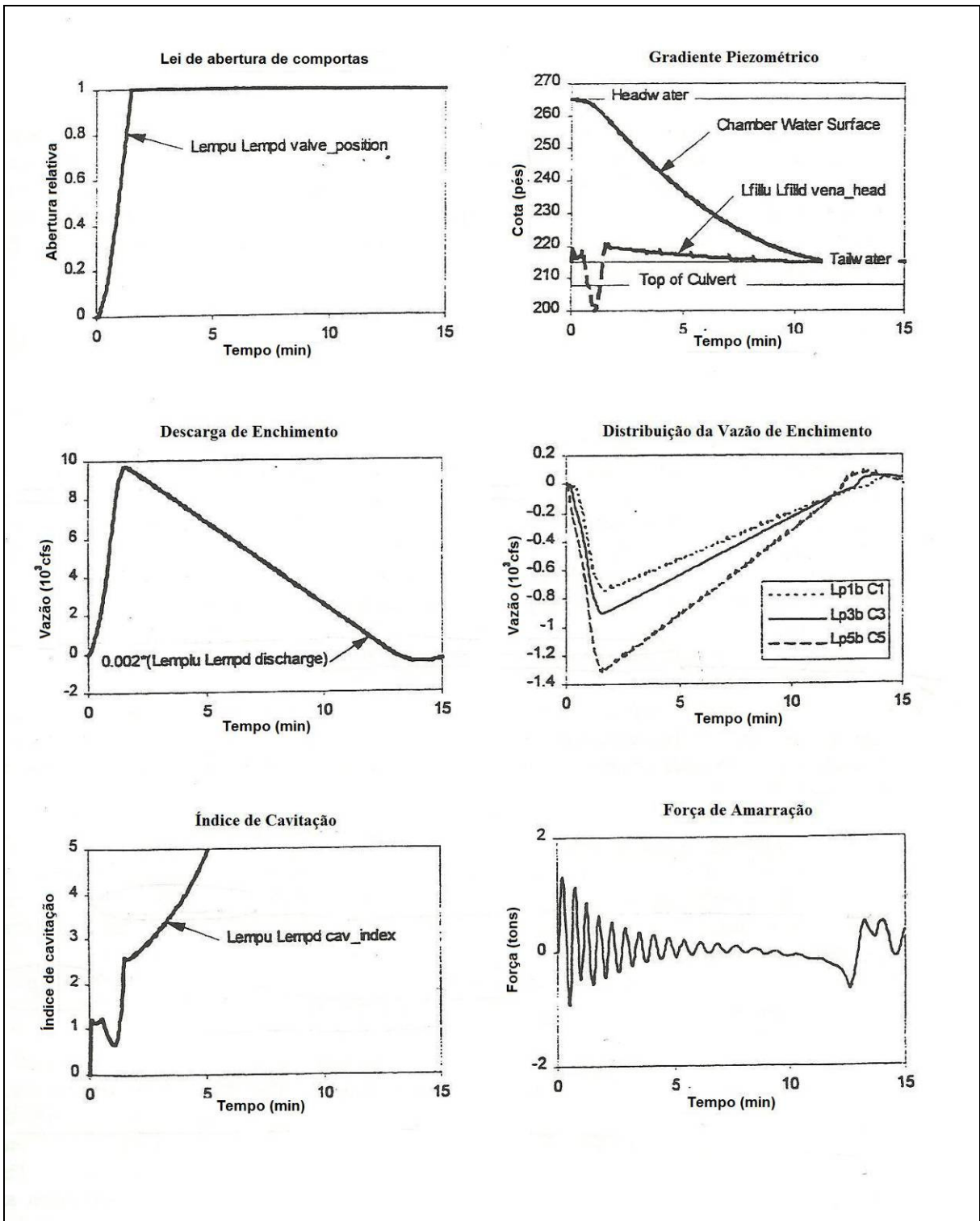


Figura 3.7 – Saída gráfica do modelo LOCKSIM para a eclusa de Wannabe
 Fonte: SCHOHL (1999)

O modelo não permite estimar a turbulência da superfície da água e a força de amarração transversal durante uma manobra de eclusagem. Entretanto, diversos estudos em modelos físicos sugerem que o aumento da quantidade de pontos de alimentação da câmara da eclusa de navegação diminui a turbulência da água (SCHOHL, 1978) e que a força de amarração transversal é tipicamente menor do que a força longitudinal (ELDER *et al.*, 1964).

Schohl *et al.* (1995) também afirmam que a variação longitudinal do nível da água durante as manobras de eclusagem é a variável de maior peso ao estimar a força de amarração das embarcações durante as manobras.

O modelo LOCKSIM, estima a força de amarração como o peso da embarcação multiplicado pela variação no instante t do nível da água em diferentes pontos da câmara da eclusa, dividido pela distância entre os pontos, ou seja:

$$F_a = \frac{W(Z_i - Z_{i+1})}{L_i} \quad (3.5)$$

na qual:

F_a = força de amarração longitudinal

W = peso da embarcação

Z_i = nível no ponto i da câmara

L_i = distância entre os pontos

Segundo Stockstill (2003), diferentes pontos de alimentação de água na câmara da eclusa provocam um desnível de água entre os respectivos pontos de entrada da água, pois diferentes distribuições de velocidades e pressões resultam em diferentes linhas de energia entre cada ponto.

As oscilações, usualmente observadas no interior da câmara, são de pequena amplitude, podendo ser uninodal ou multinodais, conforme o tipo de sistema de enchimento e esgotamento da eclusa. Segundo Ussami (1980), a oscilação primária ou uninodal é, sem dúvida, a mais importante a ser considerada, pois dela resultam as maiores amplitudes de oscilação, levando conseqüentemente a esforços mais elevados de amarração. Oscilações de

ordem mais elevada, devido à redução da amplitude de oscilação, são menos prejudiciais às eclusas.

3.3.1.2 Bases conceituais do LOCKSIM

O LOCKSIM simula uma grande gama de sistemas de enchimento e esvaziamento de eclusas que são compostos por condutos fechados e superfícies livres. Podem ser avaliados diferentes componentes como tubulação, túnel, bueiros ou qualquer outro tipo de conduto fechado. O modelo também considera comportas do tipo tainter reverso, válvulas de controle de fluxo, perda de carga no conduto, bifurcações e *manifolds*. Avaliações de superfícies livres são simuladas em canais prismáticos, canais fluviais naturais e tanques de armazenamento. Cada componente mencionado é conectado por nós, onde são calculadas as cargas piezométricas.

Na Figura 3.8 é representado um esquema de alguns dos componentes que são considerados no sistema de simulação do LOCKSIM.

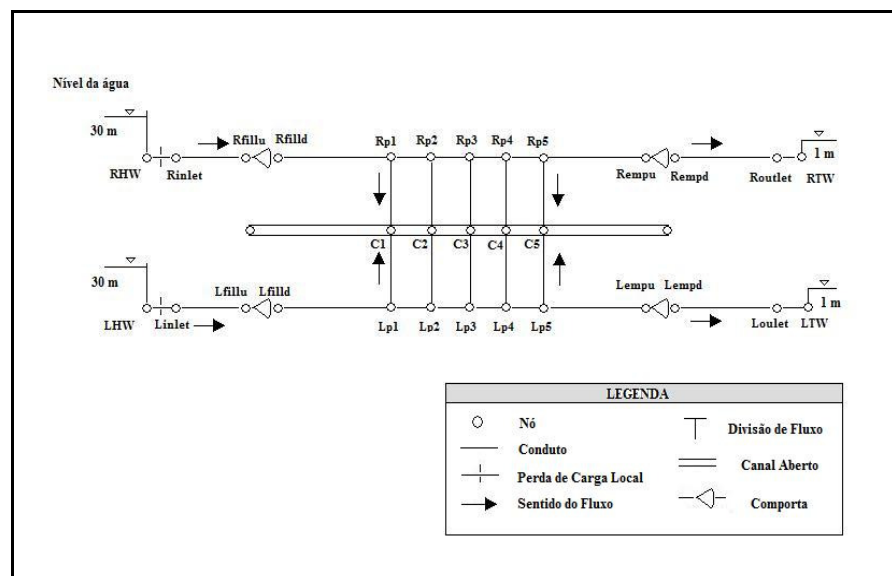


Figura 3.8 – Esquema representativo dos componentes do LOCKSIM
Fonte: Adaptado de SCHOHL (1999)

A descarga da vazão e o nível piezométrico para cada trecho da câmara da eclusa e das seções do leito natural são computados numericamente resolvendo a equação diferencial parcial unidimensional de escoamento não-permanente.

As equações de continuidade e de quantidade de movimento, representadas, respectivamente, a seguir, são resolvidas para computar o escoamento não-permanente uni-dimensional em condutos uniformes:

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\rho a^2}{A} \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (3.6)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{A}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + gA \frac{dz}{dx} + \frac{4A \tau_0}{\rho D} = 0 \quad (3.7)$$

nas quais:

p = pressão

t = tempo

A = área de seção transversal

ρ = massa específica

ε = rugosidade do conduto

τ_0 = coeficiente de cisalhamento

O diâmetro hidráulico é calculado pela seguinte equação:

$$D = \frac{4A}{P} \quad (3.8)$$

na qual:

P = perímetro molhado

O valor adotado para o coeficiente de cisalhamento, representado pelo termo τ_0 na equação 3.7, depende do escoamento ser turbulento ou laminar. O escoamento é assumido como turbulento quando o número de Reynolds (R_e) excede o número de Reynolds laminar, cujo valor é igual a 1000. No escoamento turbulento, o coeficiente de cisalhamento pode ser obtido de três maneiras, usando o fator f de Darcy-Weisbach (Equação 3.9), o coeficiente C de Hazen-Williams (Equação 3.10) ou o coeficiente de rugosidade n de Manning (Equação 3.11), sendo as expressões para cada coeficiente representadas, respectivamente, por:

$$\tau_0 = \frac{\rho f Q^2}{8A^2} \text{ (Darcy Weisbach)} \quad (3.9)$$

$$\tau_0 = \frac{3\rho g Q^{1.85}}{4D^{1/6}(CA)^{1.85}} \text{ (Hazen-Williams)} \quad (3.10)$$

$$\tau_0 = \frac{\rho g n^2 Q^2}{1,39D^{1/3}A^2} \text{ (Manning)} \quad (3.11)$$

As equações (3.10) e (3.11), para o coeficiente de cisalhamento segundo Hazen-Williams e Manning, assumem unidades inglesas. Entretanto, o LOCKSIM faz as devidas conversões quando o sistema internacional é especificado.

O fator f de Darcy Weisbach pode ser considerado como constante ou variável em função do número de Reynolds. No último caso, a aproximação explícita de Colebrook é usada, sendo essa dada pela equação a seguir:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} \approx -2,0 \log \left[\frac{\varepsilon/D}{3,7} - \frac{5,02}{R_e} \log \left(\frac{\varepsilon/D}{3,7} + \frac{13}{R_e} \right) \right] \quad (3.12)$$

O número de Reynolds é calculado conforme a equação:

$$R_h = \frac{QD}{Av} \quad (3.13)$$

na qual:

v = viscosidade cinemática

No escoamento laminar, o coeficiente de cisalhamento é dado por esta equação:

$$\tau_0 = \frac{8\rho v Q}{AD_h} \quad (3.14)$$

No LOCKSIM, as equações (3.1) e (3.2), da continuidade e de quantidade de movimento, respectivamente, são resolvidas usando o método explícito das características ou o método implícito de Preissmann. Para um dado segmento de conduto fechado, a escolha depende do comprimento do segmento, da velocidade da onda e do tamanho do espaçamento de tempo (Δt) adotado na resolução.

Tipicamente, o método das características é mais apropriado para condutos longos e simulações de eventos transientes repentinos, nos quais pequenos espaçamentos de tempo são necessários para resolver as condições de contorno. O método de Preissmann, também conhecido como método implícito de quatro pontos, é mais utilizado em pequenos condutos e simulações com eventos de gradual variação de escoamento, nos quais grandes espaçamentos de tempo são suficientes para resolver as condições de contorno.

O método das características tem uma melhor acuracidade, ou seja, uma menor dispersão numérica e um esquema de solução mais eficiente. Entretanto, para assegurar estabilidade e uma boa acuracidade, o espaçamento de tempo é limitado pela condição de Courant, dada pela expressão a seguir:

$$C_r = \frac{a\Delta t}{\Delta x} \quad (3.15)$$

na qual:

C_r = número de Courant

a = velocidade de propagação da onda

Δt = espaçamento de tempo

Δx = espaçamento da coordenada longitudinal

Os espaçamentos longitudinais do conduto e do tempo devem ser cuidadosamente escolhidos de tal forma que o número de Courant possa ser maior ou igual a um ou então o mais próximo possível de um.

Na prática, essa condicionante normalmente significa que um pequeno espaçamento de tempo é necessário ou apenas condutos longos podem ser modelados usando o método das características.

O método de Preissmann tem uma maior dispersão numérica, mas é mais estável para quaisquer espaçamentos de tempo e de comprimento de condutos. Consequentemente, condutos curtos podem ser modelados e o espaçamento de tempo pode ser determinado sem restrições, de tal forma que o problema seja resolvido com as condições de contorno de uma forma estável. Usualmente, se o espaçamento de tempo é pequeno o suficiente para resolver o problema de condições de contorno de uma maneira acurada, os resultados obtidos usando o

método de Preissmann são muito próximos aos obtidos utilizando o método das características.

Um dos tratamentos diferenciados do simulador LOCKSIM é a capacidade de determinar diferentes perdas de carga para os pontos do circuito de alimentação da eclusa. No modelo, diferentes formas geométricas são consideradas com diferentes relações de perda de carga ao longo do sistema do conduto fechado. As fontes de perda de carga consideradas são expansões, contrações, entrada e saída do conduto, orifícios e diferentes outras obstruções possíveis.

Cada trecho do circuito, representado na Figura 3.8, é considerado como uma fonte de perda de energia para o sistema. Para cada componente considerado, a perda de carga é calculada de acordo com a equação de energia, dada por:

$$\frac{Q_u^2}{2gA_u^2} + H_u = \frac{Q_d^2}{2gA_d^2} + H_d + h_1 \quad (3.16)$$

na qual:

A_u = área da seção do conduto de montante

H_u = carga piezométrica de montante

A_d = área da seção do conduto de jusante

H_d = carga piezométrica de jusante

h_1 = perda de carga

A carga piezométrica é calculada de acordo com a equação a seguir:

$$H_u = \frac{p}{\rho g} + z \quad (3.17)$$

O parâmetro h_1 , que representa a perda de carga do trecho em questão, é definido segundo as seguintes equações, em função do escoamento ser turbulento ou laminar:

$$h_1 = K \frac{Q|Q|}{2gA_i^2} \quad (\text{escoamento turbulento}) \quad (3.18)$$

$$h_1 = K \frac{vR_{lam} \sqrt{\pi Q}}{4gA_i^{3/2}} \text{ (escoamento laminar)} \quad (3.19)$$

nas quais:

K = coeficiente de perda de carga

R_{lam} = número de Reynolds laminar

A_i = área do conduto na seção i

Para obstruções, como expansão, contração e orifícios, o valor de K é considerado no modelo como constante; já no caso da comporta, o valor é dependente da abertura, a qual varia ao longo do tempo da simulação.

O valor de K para as comportas pode ser diretamente especificado por estudos de casos ou pode ser obtido de acordo com o coeficiente de descarga (C_d), conforme a equação a seguir:

$$K = \frac{1}{C_d^2} = g \left(\frac{A}{C_v} \right)^2 \quad (3.20)$$

na qual:

$C_d = C_v$ = coeficiente de descarga da comporta

O coeficiente de descarga da comporta, C_v , é normalmente usado na indústria como um coeficiente que caracteriza a comporta em questão, sendo que cada tipo de comporta tem o seu valor pré-estabelecido devido as suas características próprias.

Segue na Figura 3.9 um padrão de coeficiente de perda de carga para uma abertura relativa da comporta.

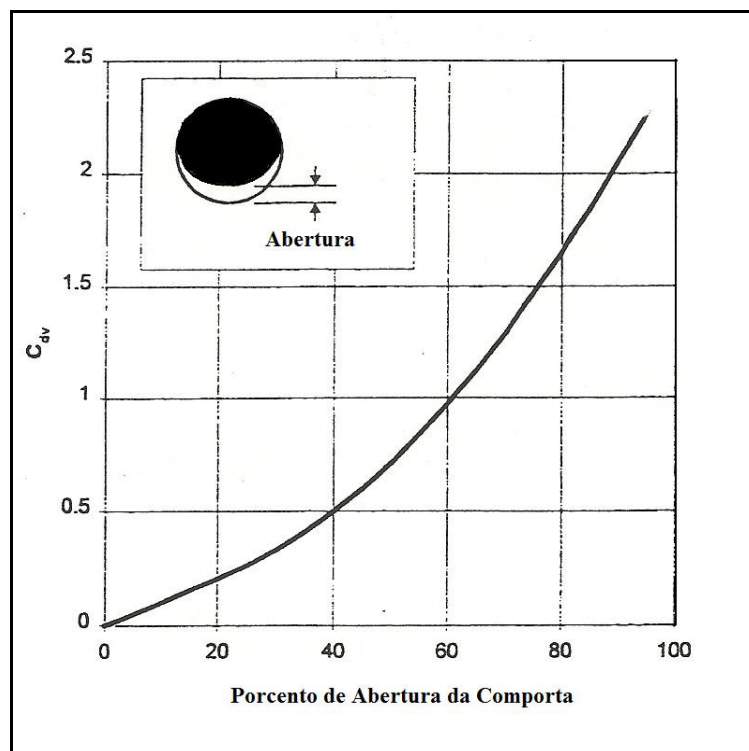


Figura 3.9 – Coeficiente de descarga para uma abertura relativa da comporta
 Fonte: USACE (1988)

O simulador LOCKSIM é um sistema de simulação de enchimento e esgotamento de eclusas de navegação que vem sendo estudado e adaptado por mais de 20 anos. Ele é tido como já consolidado para aplicações em eclusas de navegação e também considerado como uma ferramenta robusta para avaliar sistemas de enchimento e esgotamento de diferentes sistemas de eclusas (SCHOHL, 1999).

Uma descrição mais detalhada do sistema de simulação pode ser encontrada no manual do usuário (SCHOHL, 1999) que foi gerado dentro do programa de pesquisa de navegação interna (*Inland Navigation Research Program*), sob autorização do *U.S Army Corps of Engineers* e conduzido pela TVA.

3.3.2 Modelos SEEEC

Ussami (1980), motivado pela complexidade de determinar as características e as dimensões básicas do sistema de enchimento e esvaziamento de uma eclusa de navegação, desenvolveu os modelos numéricos SEEEC-I e SEEEC-II.

O primeiro modelo matemático, denominado SEEEC-I, deriva basicamente do modelo matemático *Lock Filling Emptying – Symmetrical System*, desenvolvido pelo *U.S Army*

Waterway Experiment Station (HEBLER & NEILSON, 1976). Esse modelo foi desenvolvido com algumas simplificações, que buscam uma grande facilidade em aplicação.

O segundo modelo matemático, denominado SEEEC-II, foi elaborado a partir dos estudos desenvolvidos pelos engenheiros Windson e Vallee, do *St. Lawrence Seaway Authority*, do Canadá, e também com contribuições devidas a Abbott e Verwy, do *International Institute for Hydraulic and Environmental Engineering*, de Delft, Holanda.

O modelo SEEEC-II, ao contrário do SEEEC-I, descreve sem simplificações a totalidade do escoamento em cada um dos elementos que compõem o sistema de enchimento e esgotamento, incluindo os orifícios dos difusores. Devido ao seu detalhamento, sua aplicação se torna mais trabalhosa e difícil, pois ele exige uma maior quantidade de dados.

A utilização do modelo SEEEC-II é recomendada para estudos em nível de detalhamento de projeto, quando os estudos em modelo já podem suprir os dados requeridos.

3.3.2.1 Modelo Matemático SEEEC-I

O modelo SEEEC-I considera um sistema de enchimento e esgotamento de uma eclusa de navegação de uma maneira simplificada conforme esquema apresentado na Figura 3.10, composto por:

- tomada de água a montante;
- aqueduto de montante;
- comporta;
- aqueduto de jusante; e
- câmara da eclusa ou de restituição.

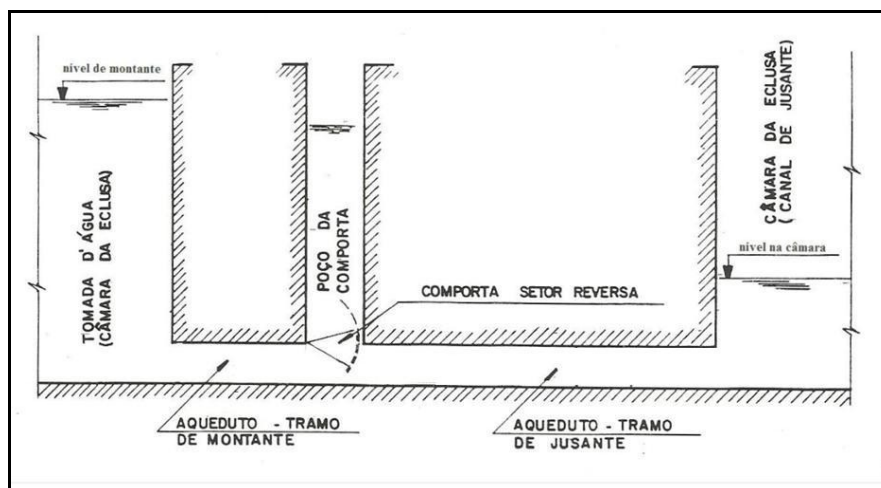


Figura 3.10 – Esquema do sistema de enchimento e esgotamento utilizado no SEEEC-I
Fonte: Ussami (1980)

USSAMI (1980) modelou o comportamento hidráulico de uma eclusa de navegação montando um sistema de equações possível e determinado com três incógnitas – posição, velocidade e a altura de inércia –, e três equações – integral da equação da continuidade em relação ao tempo, equação do escoamento e equação da altura de inércia. Essas equações estão representadas, respectivamente, a seguir:

$$Z_{t+1} - Z_t = \xi \frac{A_0}{A_1} \int_{t_i}^{t_{i+1}} V(t) dt \quad (3.21)$$

na qual:

Z_{t+1} = nível da água na câmara no instante t+1

Z_t = nível da água na câmara no instante t

ξ = coeficiente numérico para indicar enchimento (+1) ou esgotamento (-1) da câmara

A_0 = área do aqueduto na seção de referência

A_1 = área da superfície da água na câmara

$V(t)$ = velocidade média do escoamento na seção de referência

$$[K_1 + K_2 + K_v(t) + K_3 + K_4] \frac{V^2(t)}{2g} = \xi [Z_{ref} - Z(t)] - H_m(t) \quad (3.22)$$

na qual:

Z_{ref} = nível da água na câmara no instante t

H_m = altura de inércia ou carga necessária para acelerar ou desacelerar o escoamento

$$H_m = \frac{L}{g} \frac{\partial V(t)}{\partial t} \quad (3.23)$$

na qual:

L = comprimento do conduto prismático

As equações 3.21 a 3.23 formam um sistema de equações, sendo que duas delas se apresentam sob forma diferencial e a última, na forma quadrática. Como o sistema é matematicamente determinado, por possuir o mesmo número de incógnitas e equações, o problema se resume na resolução das equações diferenciais.

A resolução numérica, aplicada nas equações diferenciais, é o método de diferenças finitas, tendo sido proposto um método iterativo de predição e correções sucessivas.

Portanto, o sistema de equações que governam o comportamento hidráulico do escoamento de água na eclusa de navegação pode ser reescrito tal como se apresentam as equações a seguir:

$$[K_1 + K_2 + K_{vi}(t) + K_3 + K_4] \frac{V_i^2}{2g} = \xi [Z_{ref} - Z_i] - H_{mi} \quad (3.24)$$

$$H_{mi} = \frac{L}{g} \frac{V_i - V_{i-1}}{t_i - t_{i-1}} \quad (\text{como preditor}) \quad (3.25)$$

$$H_{mi} = \frac{L}{2g} \frac{V_{i+1} - V_{i-1}}{t_{+1} - t_{i-1}} \quad (\text{como corretor}) \quad (3.26)$$

$$Z_i = Z_{i-1} + \xi \frac{A_0}{A_1} \left(\frac{V_i - V_{i-1}}{2} \right) (t_i - t_{i-1}) \quad (3.27)$$

Nessas equações os índices (i-1), (i) e (i+1) indicam os instantes sucessivos t_{i-1} , t_i e t_{i+1} , respectivamente.

3.3.2.2 Modelo Matemático SEEEC-II

O modelo SEEEC-II foi elaborado de acordo com a esquematização do sistema de enchimento e esgotamento apresentado na Figura 3.11.

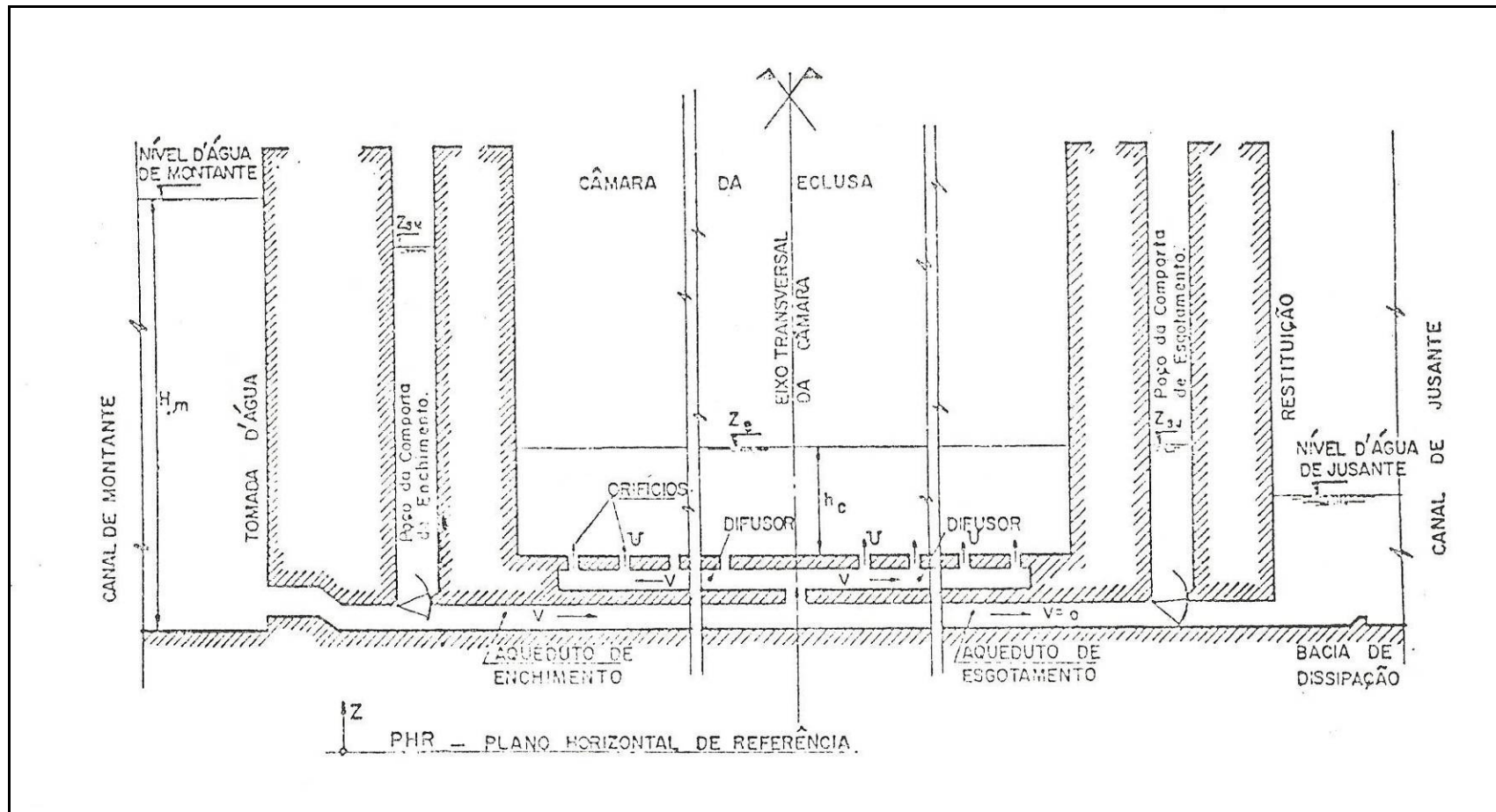


Figura 3.11 – Esquema do sistema de enchimento e esgotamento utilizado no SEEEC-II
 Fonte: Ussami (1980)

Portanto, o sistema é composto por:

- canal ou reservatório de adução;
- tomada d'água;
- aqueduto de enchimento entre a tomada d'água e o poço da comporta;
- comporta de controle de vazão de enchimento;
- aqueduto de enchimento entre o poço da comporta e difusores;
- orifícios, curvas, transições;
- câmara da eclusa;
- aqueduto de esgotamento;
- comporta de controle de vazão de esgotamento; e
- canal de restituição.

Nas operações de enchimento e esgotamento da câmara da eclusa, as vazões são controladas através de comportas ou válvulas, que são convenientemente manobradas mantendo as embarcações fora de risco de colisões devido a oscilações do nível da água no decorrer do tempo de manobra.

No modelo matemático SEEEC-II, a lei de manobra implementada é dada pelas equações a seguir:

$$\frac{d}{D} = \frac{t}{T_v} - \text{sen}\left(\pi \frac{t}{T_v}\right) \cdot a, \text{ para } t \leq T_v \quad (3.28)$$

$$\frac{d}{D} = 1, \text{ para } t > T_v \quad (3.29)$$

nas quais:

$$\frac{d}{D} = \text{grau de abertura relativa da comporta}$$

T_v = tempo de manobra da comporta

a = amplitude da lei de manobra (máxima diferença entre a abertura linear e a abertura em questão)

A lei de abertura linear é obtida para um valor de a igual a zero.

A perda de carga na comporta de controle de vazão (ΔH) foi implementada no modelo segundo as equações a seguir:

$$\Delta H = K_v(t) \frac{V^2(t)}{2g}, \text{ para } 0 < t < T_v \quad (3.30)$$

$$\Delta H = K_{v0}(t) \frac{V^2(t)}{2g}, \text{ para } t \geq T_v \quad (3.31)$$

nas quais:

K_{v0} = coeficiente de perda de carga no poço da comporta totalmente aberta

No modelo o coeficiente de perda de carga na comporta (C_v) foi determinado em função da abertura relativa da comporta, bem como em função do coeficiente de contração do jato (C_c) junto à comporta, conforme a representação na equação a seguir:

$$C_v(t) = \left[\frac{1 - C_c \frac{d(t)}{D}}{C_c \frac{d(t)}{D}} \right]^2 \quad (3.32)$$

O coeficiente de contração do jato pode ser obtido experimentalmente, contudo, em simulações onde não se exige muito rigor nos cálculos a utilização de um valor constante para o coeficiente de contração não provoca um erro muito significativo. O coeficiente de contração do jato varia aproximadamente entre 60 e 90%.

O escoamento através dos orifícios foi determinado em função da diferença de carga (ΔH) existente entre as suas respectivas extremidades, ou seja, entre a carga no difusor e na câmara da eclusa.

Portanto, a velocidade do escoamento nos orifícios é dada por:

$$U = \left[\frac{2g\Delta H}{\mu} \right]^{1/2} \quad (3.33)$$

na qual:

U = velocidade nos orifícios

μ = coeficiente de perda de carga

O coeficiente de perda de carga no orifício é determinado experimentalmente e pode ser expresso por uma equação exponencial, conforme a equação a seguir (WINDSOR & VALLEE, 1969; MCNOWN, 1954):

$$\mu = \mu_0 + a_1 \left(\frac{V}{U}\right)^{a_2} \quad (3.34)$$

na qual:

μ_0 = coeficiente de perda de carga no orifício para velocidade nula

a_1 e a_2 = coeficientes experimentais para a perda de carga nos orifícios

Stockstill *et al.* (1991) definem a carga para cada orifício a partir da equação de energia aplicada para cada um dos n orifícios da Figura 3.12, descrevendo, assim, a vazão que passa em cada orifício, ou seja:

$$H_c = \sum_{i=1}^{i=n} \left[K_f(i) \frac{Q_c(i)^2}{2gA_c(i)^2} \right] + \sum_{i=1}^{i=n-1} \left[K_c(i) \frac{Q_c(i)^2}{2gA_c(i)^2} \right] + K_p(n) \frac{Q_p(n)^2}{2gA_p(n)^2} + H_0 \quad (3.35)$$

na qual:

H_c = a carga inicial em cada orifício

$A_c(i)$ = área do conduto na seção i

$A_p(i)$ = área do orifício i

H_0 = a carga total na câmara da eclusa

$K_{f,p,c}$ = coeficientes de perda de carga no conduto, pelo orifício e após o orifício

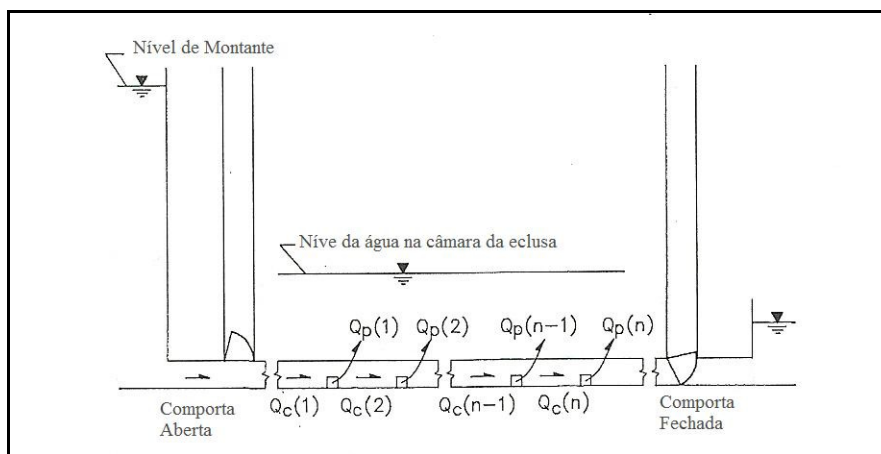


Figura 3.12 – Esquema típico para sistema de enchimento com n orifícios
 Fonte: Adaptado de Stockstill *et al.* (1991)

O coeficiente de perda de carga para cada orifício, segundo Stockstill *et al.* (1991), é definido pela equação a seguir:

$$K_T = \frac{H_c - H_o}{\frac{Q_c(i)^2}{2gA_c(i)^2}} \quad (3.36)$$

A perda de carga no poço da comporta foi determinada no modelo SEEEC-II de acordo com a seguinte equação, determinada de acordo com o teorema de Borda:

$$\Delta H = \left(1 - \frac{A_1}{A_2}\right)^2 \frac{U_1^2}{2g} + \frac{H_s}{g} \left(\frac{A_2}{A_1}\right) \frac{\partial U_1}{\partial t} \quad (3.37)$$

na qual:

H_s = altura da coluna de água no poço da comporta

U_1 = velocidade vertical média na seção de entrada do poço da comporta

Portanto, a perda de carga no poço da comporta é dada pela diferença entre a carga piezométrica no aqueduto e a cota do nível de água no poço da comporta.

O método de resolução numérica usado no SEEEC-II foi a aplicação, nas equações de continuidade e de quantidade de movimento, do método implícito de diferenças finitas.

Na Figura 3.13 estão os resultados para a aplicação do SEEEC-II para uma eclusa com 186,0 m de comprimento e 25,6 m de largura, e um desnível total de 14,2 m. A lei de abertura

utilizada é linear simples com abertura total em 80 segundos. São apresentadas as curvas características do enchimento, nas quais as principais grandezas hidráulicas relacionadas com a operação de enchimento são plotadas em função do tempo. Na mesma figura observa-se, através da curva de variação de nível da água na câmara, que o tempo de enchimento da eclusa é igual a 6,5 minutos.

Uma vez que a comporta é mantida aberta, devido aos efeitos de inércia do escoamento, observa-se uma sobre elevação máxima de 0,47 metros em relação à cota do nível de montante da eclusa.

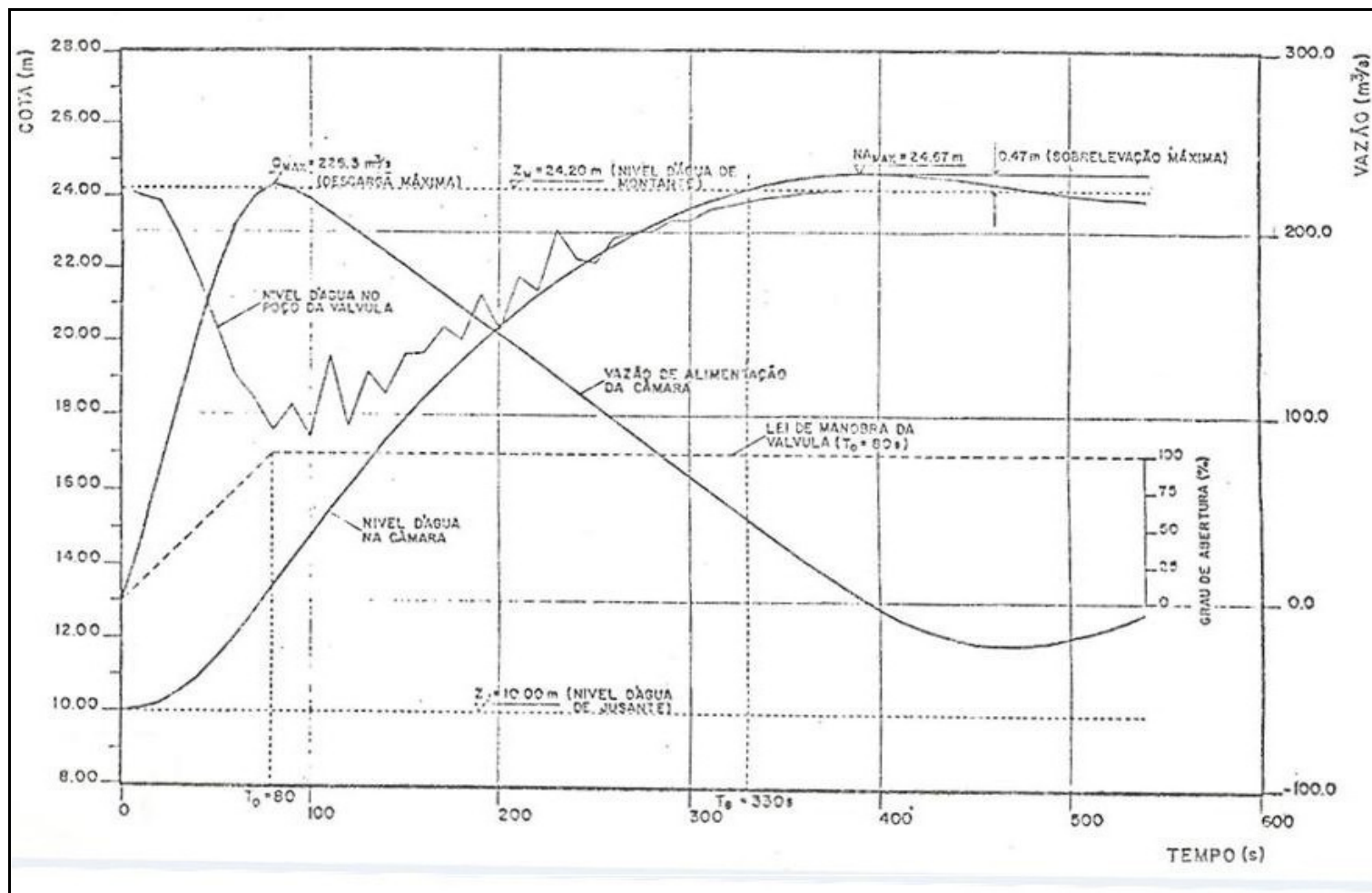


Figura 3.13 – Curvas características do enchimento utilizadas no modelo SEEC-II
 Fonte: Ussami (1980)

O modelo matemático SEEEC-II descreve os fenômenos hidráulicos que ocorrem nos aquedutos e difusores dos sistemas de enchimento e esgotamento, entretanto não descreve os fenômenos oscilatórios que ocorrem no interior da câmara da eclusa, bem como a interação com a embarcação.

3.3.3 Métodos de Runge-Kutta

Os métodos de Runge-Kutta são métodos iterativos implícitos e explícitos de resolução numérica de equações diferenciais. Todos os métodos de Runge-Kutta têm a seguinte formulação geral:

$$y_{i+1} = y_i + h\phi(x_i, y_i, h) \quad (3.38)$$

Nessa equação ϕ é a função incremento dada pela média ponderada das aproximações das derivadas. O método de Runge-Kutta de quarta ordem, conhecido pela abreviação RK4 e amplamente aplicado para resolução de equações diferenciais, inclui 4 pontos no cálculo da derivada em cada intervalo de tempo. A determinação dos parâmetros é feita com o auxílio da expansão de Taylor conforme as seguintes equações:

$$y_{i+1} = y_i + \frac{h}{6}(f_0 + 2f_1 + 2f_2 + f_3) \quad (3.39)$$

$$f_0 = f(x_0, y_0) \quad (3.40)$$

$$f_1 = f(x_0 + h/2, y_0 + (h/2)f_0) \quad (3.41)$$

$$f_2 = f(x_0 + h/2, y_0 + (h/2)f_1) \quad (3.42)$$

$$f_3 = f(x_0 + h, y_0 + hf_2) \quad (3.43)$$

sendo:

f_i = derivada de y no ponto i

O método também pode ser aplicado para resolução de equações de ordem superior por meio da obtenção e resolução de sistemas de equações. No caso do escoamento na eclusa, a resolução da equação geral do escoamento dada pela equação 3.4, é obtida transformando-a em um sistema com duas equações diferenciais de primeira ordem, como indicado na Figura 3.14.

$$\ddot{z} + (\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_v(t)) \omega^2 A_c^2 \dot{z} |\dot{z}| - \omega^2 (z - z_{ref}) = 0$$

$$\dot{z} = v = F(t, v) \quad \frac{dv}{dt} = -(\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_v(t)) \omega^2 A_c^2 v |v| + \omega^2 (z - z_{ref}) = G(t, v, z)$$

$$S_1 = F(t_i, v_i) \quad R_1 = G(t_i, v_i, z_i)$$

$$S_2 = F\left(t_i + \frac{1}{2}h, v_i + \frac{1}{2}h R_1\right) \quad R_2 = G\left(t_i + \frac{1}{2}h, v_i + \frac{1}{2}h R_1, z_i + \frac{1}{2}h S_1\right)$$

$$S_3 = F\left(t_i + \frac{1}{2}h, v_i + \frac{1}{2}h R_2\right) \quad R_3 = G\left(t_i + \frac{1}{2}h, v_i + \frac{1}{2}h R_2, z_i + \frac{1}{2}h S_2\right)$$

$$S_4 = F(t_i + h, v_i + h R_3) \quad R_4 = G(t_i + h, v_i + h R_3, z_i + h S_3)$$

$$z_{i+1} = z_i + \frac{1}{6} (S_1 + 2S_2 + 2S_3 + S_4) h \quad v_{i+1} = v_i + \frac{1}{6} (R_1 + 2R_2 + 2R_3 + R_4) h$$

Figura 3.14 – Equações da aplicação do método de Runge-Kutta para eclusagem

Por ser um método de resolução de equações diferenciais tanto de primeira ordem como de ordens superior, o método RK4 é bastante amplo em aplicações. Stockstill (2003) utiliza o método para a resolução da equação da força de amarração provocado pela oscilação do nível de água na câmara da eclusa. O item 3.4.2 possui uma descrição mais detalhada da equação e de seus parâmetros.

3.3.4 Transformada de Laplace

O método da transformada de Laplace resolve equações diferenciais e correspondentes problemas de valor iniciais e problemas de valor de contorno. O processo de solução consiste em transformar o problema da resolução de uma equação diferencial em um problema algébrico.

Seja $f(t)$ uma função dada que é definida para todo $t \geq 0$. A transformada de Laplace da função $f(t)$, normalmente notada por $L(f)$, é obtida pela seguinte integração:

$$F(s) = \int_0^{\infty} e^{-st} f(t) dt \quad (3.44)$$

A função $F(s)$, de variável s , é chamada de transformada de Laplace da função original $f(t)$.

Petry & Palmier (1991) aplicaram a transformada na equação geral do escoamento dada pela equação 3.4 e obtiveram equações para a posição, velocidade e aceleração do nível da água na câmara da eclusa, conforme descrição a seguir:

$$\int_0^{\infty} e^{-st} z'' dt + \int_0^{\infty} e^{-st} \Phi(t) \omega^2 dt + \int_0^{\infty} e^{-st} \omega^2 z dt - \int_0^{\infty} e^{-st} \omega^2 z_{res} dt = 0 \quad (3.45)$$

na qual:

$$\Phi(t) = (\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_v(t)) A_c^2 z' |z'|$$

Conforme as propriedades da transformada da Laplace (BOYCE & DIPRIMA 2002), têm-se:

$$\int_0^{\infty} e^{-st} z'' dt = s^2 z - s z_0 - z_0'$$

$$\int_0^{\infty} e^{-st} \omega^2 z dt = \omega^2 z$$

$$\int_0^{\infty} e^{-st} \Phi(t) \omega^2 dt = -\omega^2 \Phi(s)$$

$$\int_0^{\infty} e^{-st} \omega^2 z_{res} dt = \frac{\omega^2}{s} z_{res}$$

Portanto, a equação passa a ser:

$$z(s) = \frac{s}{s^2 + \omega^2} z_0 + \frac{1}{s^2 + \omega^2} z_0' + \frac{\omega^2}{(s^2 + \omega^2)s} z_{res} - \frac{\omega^2}{s^2 + \omega^2} \Phi(s)$$

A transformada inversa fornece a seguinte expressão para a posição do nível da água na câmara:

- Posição:

$$z(t) = z_0 \cos(\omega t) + \frac{z_0'}{\omega} \text{sen}(\omega t) + z_{ref} (1 - \cos(\omega t)) - \omega \int_0^t \Phi(\xi) \text{sen}(\omega(t - \xi)) d\xi \quad (3.46)$$

A expressão anterior, após expansão do arco-duplo de seno e derivações em t , fornece:

- Posição:

$$z(t) = z_{res} - (z_{res} - z_0) \cos(\omega t) + \frac{z_0'}{\omega} \sin(\omega t) - \omega \sin(\omega t) \int_0^t \Phi(\xi) \cos(\omega \xi) d\xi + \omega \cos(\omega t) \int_0^t \Phi(\xi) \sin(\omega \xi) d\xi \quad (3.47)$$

- Velocidade:

$$z'(t) = \omega(z_{ref} - z_0) \sin(\omega t) + z_0' \cos(\omega t) - \omega^2 \cos(\omega t) \int_0^t \Phi(\xi) \cos(\omega \xi) d\xi - \omega^2 \sin(\omega t) \int_0^t \Phi(\xi) \sin(\omega \xi) d\xi \quad (3.48)$$

- Aceleração:

$$z''(t) = \omega^2(z_{ref} - z_0) \cos(\omega t) - \omega z_0' \sin(\omega t) - \omega^2 \Phi(t) + \omega^3 \sin(\omega t) \int_0^t \Phi(\xi) \cos(\omega \xi) d\xi - \omega^3 \cos(\omega t) \int_0^t \Phi(\xi) \sin(\omega \xi) d\xi \quad (3.49)$$

nas quais:

$$\Phi(t) = (\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_v(t)) A_c^2 z' |z'|$$

Desta forma, as três variáveis (posição, velocidade e aceleração) do nível da água dependem de integrais. Os valores dessas integrais têm que ser calculados por alguma aproximação.

Palmier (1990), após alguns testes de aproximações e comparando as variáveis provenientes pelo método Runge-Kutta, observou grande correspondência e uma maior precisão com a aproximação da função $\Phi(t)$ como linear e integrando de forma exata a cada intervalo.

3.4 Modelos numéricos de otimização

Diversos modelos matemáticos foram desenvolvidos para simular o enchimento e o esvaziamento das câmaras de eclusas, sendo aplicadas algumas leis de manobras para as comportas. Apesar de bastante eficientes para tal análise, esses modelos limitam-se a validar as leis previamente estabelecidas.

O uso da otimização numérica é um importante passo na área de pesquisa, pois resulta em uma maior compreensão do fenômeno físico de enchimento e esvaziamento, além de uma maior sensibilidade quanto à melhoria das manobras de eclusagem, visando com isso solucionar alguns problemas específicos evidenciados.

Com o avanço de recursos computacionais, a otimização por meio de modelos numéricos tem sido empregada em estudos de eclusagem ao longo do tempo, entretanto ainda pode ser mais explorada por possuir grande relevância para a obtenção de operações de enchimento e esvaziamento de uma forma segura e mais rápida, possibilitando também uma redução nos tempos de manobras e proporcionando uma melhor opção econômica, tendo assim resultados diretos no aumento da competitividade dos produtos e a redução dos gastos com transportes por vias fluviais.

3.4.1 Kelley's *cutting plane* method

Palmier (1990) desenvolveu um modelo numérico para otimização de manobras de abertura e fechamento das comportas das eclusas de navegação aplicando o método *cutting plane* de otimização, visando minimizar problemas de cavitação nos aquedutos de enchimento e esvaziamento e alimentação não uniforme da câmara, mas obtendo uma operação mais rápida possível em vista das vantagens econômicas proveniente de ciclos de eclusagem mais curtos.

A partir das equações 3.47 a 3.49 Palmier (1990) desenvolveu um modelo de otimização utilizando o método *cutting plane*.

Buscando otimizar a lei de abertura de uma eclusa a ideia intuitiva é alcançar o maior nível final da água em um menor tempo possível. Portanto a função objetivo mais intuitiva a ser adotada é a maximização no nível final da água na câmara da eclusa. Entretanto, como as equações 3.47 a 3.49, que regem a modelagem do problema em questão, estão todas em função da derivada da posição no tempo, ou seja, da velocidade, a função objetivo adotada foi relacionada à maximização da velocidade média do nível da água na câmara da eclusa, que não deixa de ser verdade que a posição final da água na eclusa será a máxima possível.

Arbitrando-se a velocidade do nível da água positiva quando a eclusa está em procedimento de enchimento, e negativa no esvaziamento, as funções objetivos adotadas foram:

$$FO_1 = \frac{1}{T} \int_0^T z' dt, \text{ para enchimento} \quad (3.50)$$

$$FO_2 = -\frac{1}{T} \int_0^T z' dt, \text{ para esvaziamento} \quad (3.51)$$

nas quais:

T = tempo total de operação

O critério de convergência adotado na aplicação do método *cutting plane*, para o nível máximo da água, é a igualdade (com uma precisão previamente estipulada) dos valores de níveis na interação atual com o nível da interação anterior.

Conforme essa formulação, o tempo total T de operação é fixo e determinado no início da aplicação do método, a posição do nível da água final na câmara de navegação da eclusa é livre e, com a maximização da velocidade média do nível da água, será também maximizado o nível d'água final na câmara.

Portanto, após atender o critério de convergência para um tempo T fixo, é necessária uma segunda etapa, na qual se verifica se o tempo total T é o tempo mínimo de operação. Isso é feito comparando-se a posição final alcançada do nível da água na câmara com a cota do nível da água do reservatório (caso de enchimento) ou do canal de jusante (caso do esgotamento).

Na etapa de enchimento, por exemplo, são possíveis os seguintes casos:

- a) em alguma etapa, mesmo antes de se conseguir a convergência do nível máximo, a cota do nível na câmara ultrapassa a cota do nível da água do reservatório;
- b) depois de obtida a convergência de nível máximo, a cota final do nível da água é mais alta do que a cota do nível do reservatório;
- c) depois de obtida a convergência de nível máximo, a cota final do nível da água é mais baixa do que a cota do nível do reservatório; e
- d) depois de obtida a convergência de nível máximo, a cota final do nível da água é igual à cota do nível do reservatório (ou tão próxima quanto se queira).

Nos casos (a) e (b), o tempo T inicialmente escolhido é maior do que o tempo ótimo. Uma vez que durante a operação foi atingida uma cota do nível da água superior àquela do reservatório, repete-se o processo para um tempo T' menor do que o tempo T utilizado.

No caso (c), o tempo T escolhido é menor do que o tempo ótimo, pois não há como chegar a uma cota superior do nível da água para esse tempo específico. Repete-se o processo com um tempo total T' maior.

No caso (d), a lei de manobra da comporta correspondente indica a melhor lei que pode ser obtida. O tempo de operação é mínimo e a cota do nível da é igual àquela do reservatório.

A lei de manobra das comportas, para cada T fixo, deve maximizar a diferença de nível inicial e final no processo total da manobra de eclusagem. Porém, um enchimento/esvaziamento muito rápido pode causar alguns riscos, como uma excessiva força de amarração, comprometimento dos circuitos hidráulicos devido à ocorrência de cavitação, dentre outros problemas que aumentam o risco de acidentes para as embarcações.

Para a obtenção de uma lei de manobra ótima, Palmier (1990) utilizou algumas restrições, previamente inseridas no modelo, que balizam a busca para uma lei de manobra ideal e segura.

A primeira das condições impostas ao modelo foi o atendimento, em qualquer intervalo de tempo da manobra, da equação geral do escoamento (equação 3.4). Essa é uma restrição inerente ao funcionamento da eclusa.

As outras restrições são impostas para evitar uma manobra incompatível aos critérios de segurança para operação, ou às limitações dos equipamentos das eclusas. As restrições utilizadas foram:

- Segurança contra a cavitação:

$$\sigma(t) > \sigma_{crítico} \quad (3.52)$$

sendo:

$$\sigma(t) = \frac{p_v + (p_{atm} - p_w)}{\gamma \frac{v_v^2(t)}{2g}}$$

na qual:

$\sigma_{crítico}$ = valor crítico do índice de cavitação

p_v = pressão mínima na seção contraída do jato

p_{atm} = pressão atmosférica local

p_w = pressão de vapor da água

v_v = velocidade do jato na seção contraída

O valor do $\sigma_{crítico}$ é normalmente estabelecido pelo fabricante do conduto ou determinado pela prática das aplicações durante as leis de manobras.

A pressão mínima do jato (p_v) ocorre na seção contraída a jusante da comporta de controle de vazão, mais precisamente na seção da *vena contracta*. Admitindo que a área do aqueduto na seção seja retangular, a área é dada por: $A = B.d$ (B é a largura e d é a altura da comporta) e a pressão mínima é obtida pela equação:

$$\frac{p_v}{\gamma} = z_{ref} - z_v - \left(k_1 + \frac{A_1^2}{C_c^2 A^2} \right) \frac{A_c^2 \dot{z}^2}{2gA_1^2} - \frac{z''}{\omega_1^2} - \frac{C_c}{B_v} A \quad (3.53)$$

Essa restrição garante que o valor do índice de cavitação durante a manobra de eclusagem esteja sempre superior ao valor crítico estabelecido.

- Limitação das velocidades máximas de abertura e fechamento das comportas:

$$-v_{max} < \frac{dA}{dt} < v_{max} \quad (3.54)$$

na qual:

v_{max} = máxima velocidade do servo mecanismo

Essa restrição respeita o limite prático para a velocidade máxima de operação da comporta, tanto na abertura quanto no fechamento.

- Limitação da velocidade máxima na câmara da eclusa:

$$\left| z' \right| \leq \left| z'_{\max} \right| \quad (3.55)$$

na qual:

z'_{\max} = velocidade máxima ascendente ou descendente

Essa restrição visa uma maior segurança para as embarcações. Com o intuito de reduzir os riscos de ruptura dos cabos de amarração e colisões na embarcação, provocados devido às perturbações no interior da câmara, limites de velocidades máximas ascendentes e descendentes do nível da água são sugeridos durante a operação.

Deve-se salientar que, caso o enchimento ou esgotamento da câmara fosse perfeitamente uniforme, não haveria limite de velocidade, já que os esforços nos cabos são proporcionais às ondulações no interior da câmara.

Considerando os dados da eclusa de Promissão com desnível inicial de 24,08m, nas Figuras 3.14 e 3.15 são ilustradas, respectivamente, a comparação da lei de manobra otimizada com a lei usual e a evolução do nível da água na câmara da eclusa para cada manobra de um processo de otimização.

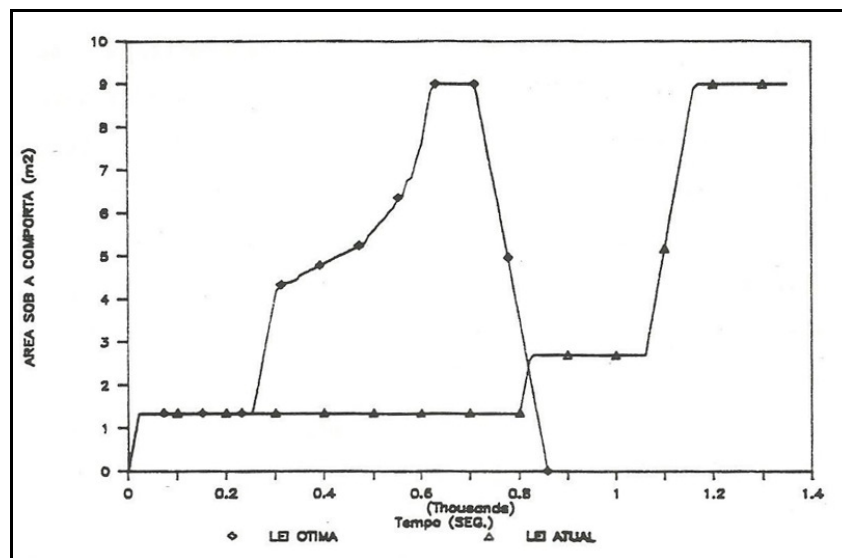


Figura 3.15 – Lei de otimização para Promissão
Fonte: Palmier (1990)

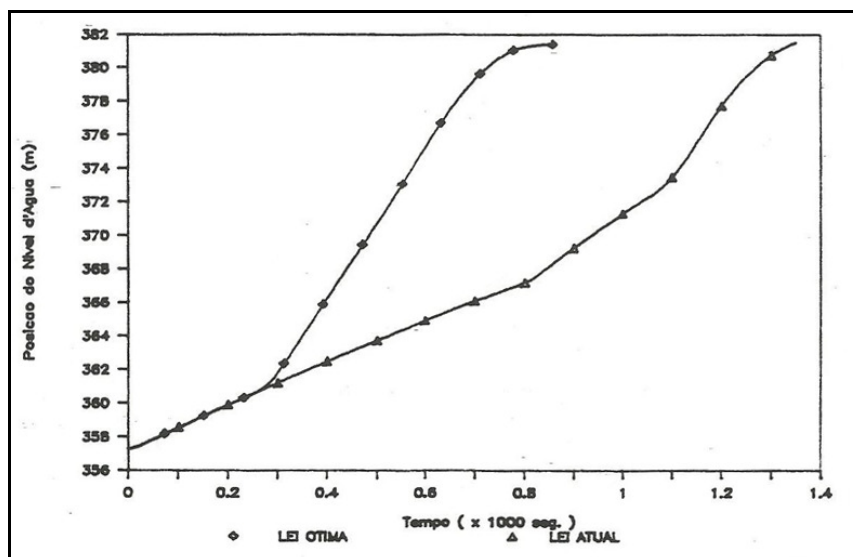


Figura 3.16 – Evolução do nível para lei ótima para eclusa de Promissão
 Fonte: Palmier (1990)

Palmier (1990) obteve uma redução do tempo de enchimento superior a 35% para alcançar o mesmo nível de montante da lei utilizada para a eclusa de Promissão e dentro das restrições impostas de segurança e operacionalidade.

3.4.2 Colamussi, Desiderio e D'Amico

Colamussi *et al.* (1974) desenvolveram um modelo matemático para simulação de enchimento e esvaziamento de uma eclusa de navegação com sistema lateral de alimentação de água. Várias simulações foram realizadas para enchimento e esvaziamento para diferentes valores de nível de montante nível na câmara da eclusa, tendo sido obtido pesos para os principais parâmetros.

A aplicação do modelo desenvolvido foi para a eclusa de Volta Grimana, localizada na Itália, com o principal objetivo de buscar uma otimização da abertura das comportas para aumentar a capacidade de trânsito por meio de eclusagens.

Para a determinação do modelo matemático as seguintes premissas foram adotadas:

- as seções do conduto principal e o diâmetro da tomada de água são consideradas fixas;
- a perda de carga piezométrica, quando se passa de uma seção do aqueduto com uma alta velocidade para uma boca de alimentação de água da câmara, é considerada por um coeficiente variável;
- a superfície livre da eclusa é horizontal; e

- não se considera a presença da embarcação durante o enchimento.

O modelo adotado na fase de enchimento o modelo adotado é apresentado na Figura 3.17, sendo que:

$V_1, V_2, \dots V_n$ são as velocidades nas seções do aqueduto;

$U_1, U_2, \dots U_n$ são as velocidades nas bocas de tomada da água da câmara;

$l_1, l_2, \dots l_n$ são as cargas piezométricas entre cada boca de tomada da água;

$a_1, a_2, \dots a_n$ são as áreas de cada boca de tomada da água;

$A_1, A_2, \dots A_n$ são as áreas de cada seção do aqueduto;

$\beta_1, \beta_2 \dots \beta_n$ são os coeficientes individuais para cada seção do aqueduto;

$\Theta_1, \Theta_2 \dots \Theta_n$ são os coeficientes individuais para cada boca de tomada de água;

L é o comprimento da câmara da eclusa;

S é a área da câmara da eclusa;

H é o nível de água a montante; e

h é o nível de água na câmara.

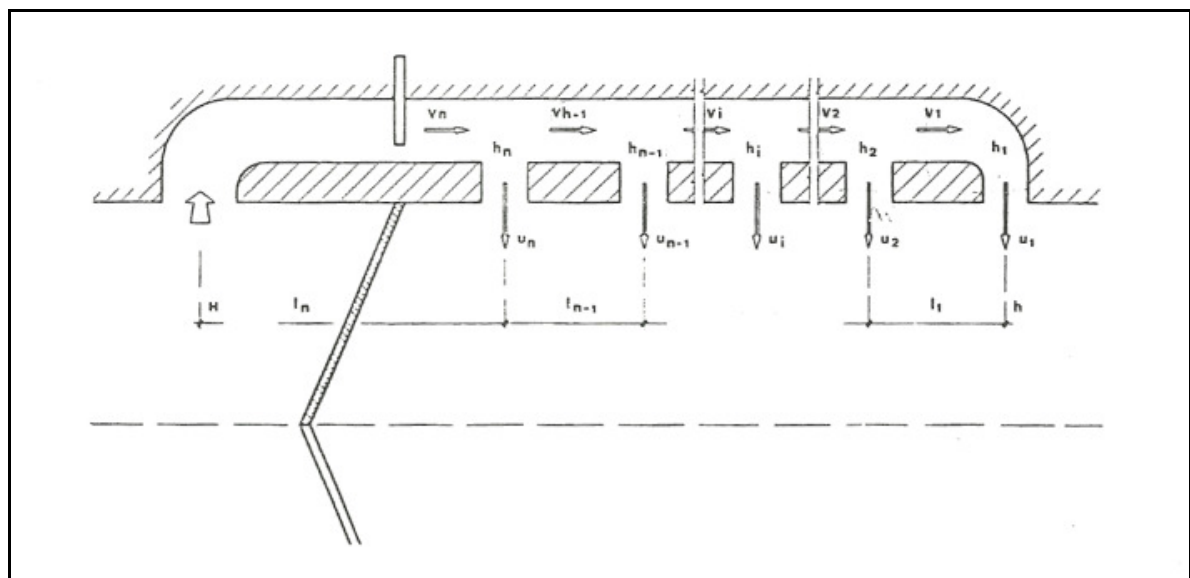


Figura 3.17 – Representação do modelo matemático para enchimento lateral de uma eclusa de navegação

Fonte: Colamussi *et al.* (1974)

O sistema de equações adotado foi:

$$h_1 - h = \Theta_1 \frac{u_1^2}{2g} + \frac{L}{g} \frac{du_1}{dt} \quad (3.56)$$

$$V_1 A_1 = u_1 a_1 \quad (3.57)$$

$$h_2 - h_1 = \beta_1 \frac{V_1^2}{2g} + \frac{l_1}{g} \frac{dV_1}{dt} + \alpha \left(\frac{V_1^2}{2g} - \frac{V_2^2}{2g} \right) \quad (3.58)$$

$$V_2 A_2 = u_1 a_1 + u_2 a_2 \quad (3.59)$$

$$h_i - h = \Theta_i \frac{u_i^2}{2g} + \frac{L}{g} \frac{du_i}{dt} \quad (3.60)$$

$$h_{i+1} - h_i = \beta_i \frac{V_i^2}{2g} + \frac{l_i}{g} \frac{dV_i}{dt} + \alpha \left(\frac{V_{i-1}^2}{2g} - \frac{V_i^2}{2g} \right) \quad (3.61)$$

$$h_{n+1} = h_n (i + \beta_n) \frac{V_n^2}{2g} + \frac{l_n}{g} \frac{dV_n}{dt} \quad (3.62)$$

$$S \frac{dh}{dt} = V_n A_n \quad (3.63)$$

A interpretação do sistema de equações é a aplicação da equação de Bernoulli para cada seção do aqueduto e a velocidade na seção i do aqueduto é igual à soma das velocidades das $i-1$ bocas de montante.

Como o sistema de equações proposto não possui solução direta, Colamussi *et al.* (1974) aplicaram um método iterativo de resolução que consiste em fixar por tentativa um valor para u_1 e em seguida inferir pela primeira equação do sistema o valor de h_1 , pelo processo iterativo são obtidos os valores de u_i , V_i , e h . Ao final se confronta o valor de h_{n+1} com H : se esses forem iguais, o valor de u_1 é aceito, caso contrário é testado um valor diferente para u_1 em função da diferença de $H - h_{n+1}$ e se refaz o cálculo para anular a diferença obtida.

O processo é repetido até que seja obtida igualdade entre H e h .

As dimensões para eclusa de Volta Grimana utilizadas foram:

$$A_1 = A_2 = A_n = 14,04 \text{ m}^2;$$

$$a_1 = a_2 = a_n = 0,779 \text{ m}^2;$$

$$l_1 = l_2 = l_n = 7,2 \text{ m}.$$

Foram escolhidos os valores de 30 s e 60 s para o tempo de abertura (t_a) das comportas. A fim de estabelecer um critério para o comportamento hidráulico durante o enchimento, foi adotada uma máxima velocidade do nível da água na câmara. Tal parâmetro, denominado V_{am} , foi calculado pela equação:

$$V_{am} = \frac{\left(q_1 - \frac{dh}{dt} S_1 \right)}{hL_0} \quad (3.64)$$

na qual:

q_1 = vazão de água afluyente na primeira metade da eclusa

$\frac{dh}{dt}$ = velocidade de saída do nível da água na câmara

S_1 = área da planta da primeira metade da câmara da eclusa

Colamussi *et al.* (1974) realizaram simulações variando H , h , β , t_a e b_0 , sendo que b_0 corresponde ao coeficiente de primeira ordem do polinômio de aproximação de Θ obtido experimentalmente. Concluiu-se que, partindo de valores iguais de H e h , a variação de todos os outros parâmetros provoca uma alteração pouco significativa do valor T do tempo total de enchimento, uma vez que o menor valor foi de 196 s e o maior de 239 s, equivalente a 16 % de variação.

Muito significativa é a pequena influência de b_0 no tempo de enchimento, sendo desnecessária a construção de um modelo físico para a obtenção de seu valor. E o valor de V_{am} é fortemente determinado pelos parâmetros t_a e b_0 . Concluiu-se que ao final de uma manobra ótima, o valor de b_0 é o menor possível.

Seguem no ANEXO 1 os resultados em tabela e gráficos para os ensaios realizados por Colamussi *et al.* (1974).

3.4.3 Natale e Savi

Dando grande importância à segurança das embarcações durante as manobras de eclusagem, Natale & Savi (2000) desenvolveram um modelo matemático para simular o enchimento/esvaziamento de eclusas de navegação levando em conta a força de amarração dos cabos de segurança das embarcações em conjunto com um modelo numérico de otimização. Com esse modelo, foram testadas diferentes leis de manobras de enchimento/esvaziamento obtendo uma operação otimizada que minimiza o tempo de enchimento mantendo a força de amarração entre valores admissíveis, conforme as expressões a seguir:

$$T_c^* = \min_{a_i, t_i}(T) \quad (3.65)$$

$$R \leq R^* \text{ sendo } R = \max_{0 \leq t \leq T_c}(|r(t)|) \quad (3.66)$$

na qual:

T_c^* = tempo ótimo de operação

$r(t)$ = força de amarração no instante t

R^* = força de amarração máxima admitida

As equações usadas para o movimento do nível da água estão representadas a seguir de forma matricial:

$$\frac{\partial}{\partial t} \begin{vmatrix} A \\ Q \end{vmatrix} + \frac{\partial}{\partial x} \begin{vmatrix} Q \\ gS + \left(\frac{Q^2}{A}\right) \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 0 \\ -gAS_f \end{vmatrix} \quad (3.67)$$

sendo:

$$S = \int_0^h b_l(\eta)(h - \eta)d\eta$$

na qual:

S_f = atrito

b_l = largura da seção de escoamento

h = profundidade do escoamento

Para a mensuração do movimento da embarcação foi considerado que o empuxo sempre contrabalança o peso da embarcação. Portanto, o movimento da embarcação foi simulado pela equação de vibração de um sistema amortecido com dois graus de liberdade, conforme a seguinte equação:

$$M_I \ddot{\xi} + M_D \dot{\xi} + M_R \xi = \Phi \quad (3.68)$$

sendo:

$$\xi = \begin{bmatrix} s \\ \theta \end{bmatrix}$$

$$M_I = \begin{bmatrix} M_{ss} & S_{s\theta} \\ S_{\theta s} & I_{\theta\theta} \end{bmatrix}$$

$$M_D = \begin{bmatrix} b_{ss} & b_{s\theta} \\ b_{\theta s} & b_{\theta\theta} \end{bmatrix}$$

$$M_R = \begin{bmatrix} c_{ss} & c_{s\theta} \\ c_{\theta s} & c_{\theta\theta} \end{bmatrix}$$

$$\Phi = \begin{bmatrix} F \\ M \end{bmatrix}$$

s = deslocamento rotacional no eixo transversal da embarcação

θ = deslocamento rotacional no eixo longitudinal da embarcação

Os termos das matrizes são referenciados pelas simplificações a seguir:

$$M_{ss} = M_s (1 + C_a) \rightarrow M_s \quad (3.69)$$

na qual:

M_s = massa da embarcação

C_a = coeficiente de massa adicional

$$I_{\theta\theta} = I_\theta (1 + C_\theta) \rightarrow I_\theta \quad (3.70)$$

na qual:

I_{θ} = momento de inércia no eixo longitudinal

C_{θ} = coeficiente de momento adicional

O coeficiente F representa a força horizontal, a qual é computada pela soma das forças de pressão hidrostática, de atrito e de arraste.

Os elementos das matrizes M_I , M_D e M_R fora da diagonal principal representam interações entre os graus de liberdade e podem ser negligenciados.

O sistema de equações foi resolvido por Natale & Savi (2000) aplicando um esquema implícito de diferenças finitas. Os resultados foram comparados com os dados reais da eclusa de Born – 155,0 m de comprimento, 16,0 m de largura e desnível de 11,35 m – e da eclusa de Well – 179 m de comprimento, 14 m de largura e desnível de 6,25 m –, ambas localizadas na Europa. Nas Figuras 3.18 e 3.19 são mostrados os resultados para os níveis de água na câmara da eclusa de Born e para a força de amarração para a de Well.

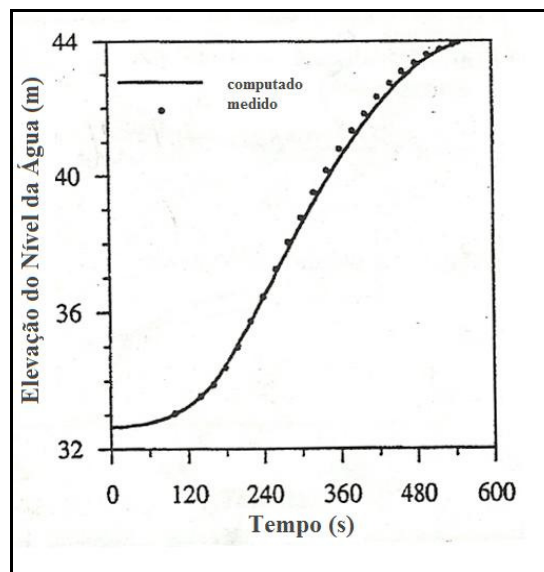


Figura 3.18 – Nível da água medido e computado para a eclusa de Born
Fonte: Natale & Savi (2000)

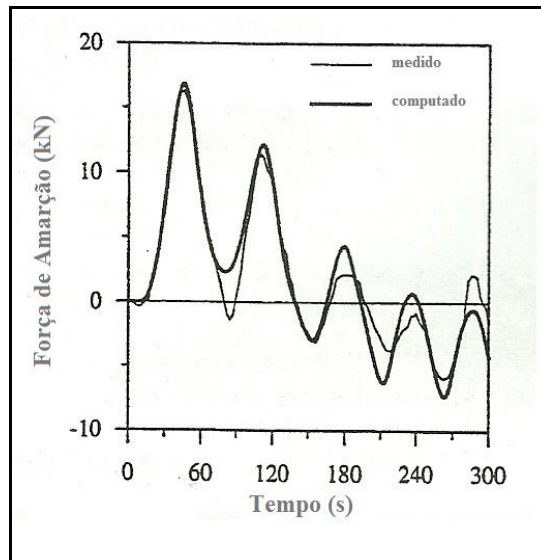


Figura 3.19 – Força de amarração medida e computada para a eclusa de Well
 Fonte: Natale & Savi (2000)

Os resultados comparativos entre o modelo desenvolvido e os dados medidos foram bem satisfatórios e mostram que a força de amarração possui um maior valor no início da operação e tende a diminuir durante o enchimento da câmara da eclusa.

Devido à grande importância de mensurar as forças de amarração das embarcações durante as eclusagens, Stockstill (2003) utilizou uma equação massa-mola para descrever o sistema de amarração das embarcações.

Durante as operações de eclusagem a força de amarração é estimada pela seguinte equação:

$$(1 + C_a)m_v\ddot{s}_l + C_h\dot{s} + (K_0 + ks) = F \quad (3.71)$$

na qual:

s_l = deslocamento da embarcação

C_a = massa adicional da embarcação

m_v = massa da embarcação

C_h = coeficiente hidrodinâmico

K_0 = tensão inicial da amarração

k = constante k da amarração

F = soma de forças externas na embarcação

O lado direito da equação 3.71 é a soma de três forças externas, representadas pelas equações a seguir:

- Força hidrostática:

A força hidrostática é mensurada pela diferença das forças agindo na polpa e na proa da embarcação, segundo a equação:

$$F_s = \rho g b d l S_s \quad (3.72)$$

na qual:

dl = largura da embarcação

S_s = declividade da superfície da água

- Força de cisalhamento:

$$F_\tau = \frac{1}{2} C_f \rho A V |V| \quad (3.73)$$

na qual:

C_f = coeficiente de fricção

- Força hidrodinâmica:

A força hidrodinâmica é a força necessária para acelerar o fluido:

$$F_p = \frac{1}{2} \rho b d C_p V |V| \quad (3.74)$$

na qual:

C_p = coeficiente de pressão

A variação temporal do deslocamento da embarcação, representada pela variável *s*, foi determinada por meio da aplicação do método de Runge-Kutta de 4º ordem na equações 3.55. O valor da força de amarração resultante é calculado multiplicando-se o valor de *s* por *k*, conforme a equação a seguir:

$$F_{\text{amarração}} = s * k \quad (3.75)$$

Stockstill (2003), com base em diversos testes em laboratório com várias configurações da câmara de navegação, obteve para o coeficiente k da equação (3.59), que tem como variável o deslocamento da embarcação, o valor de 291,88 N/m e um valor de 0,5 para o coeficiente de massa adicional na embarcação (C_a).

Na Figura 3.20 está representado o resultado gráfico para a força de amarração ao longo do tempo.

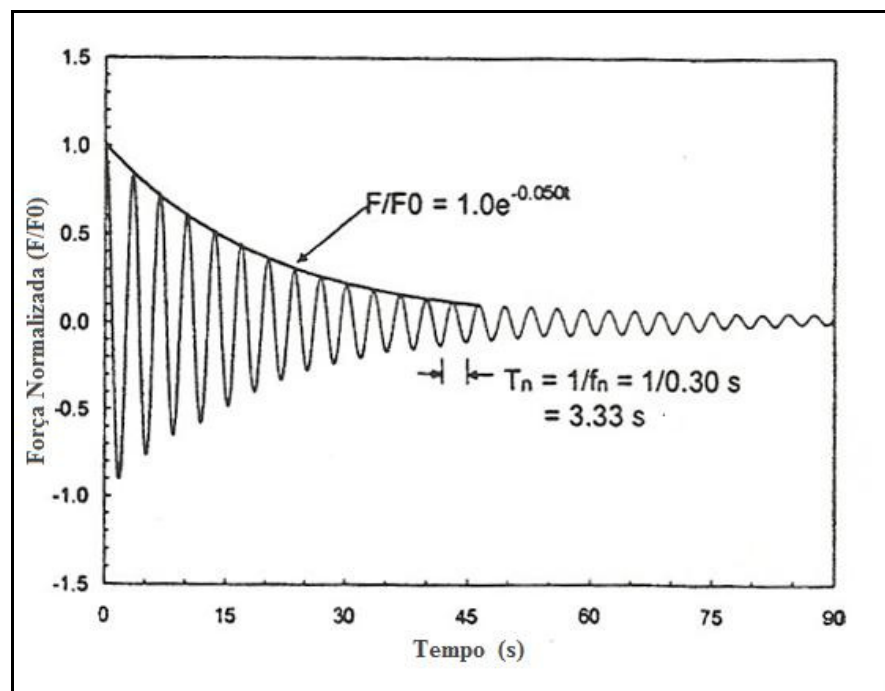


Figura 3.20 – Força de amarração medida em laboratório
Fonte: Stockstill (2003)

Os resultados dos testes realizados mostram que a força de amarração possui uma característica oscilatória em que os picos de amplitude diminuem ao longo da manobra de uma maneira exponencial.

3.4.4 Algoritmos genéticos

Os algoritmos genéticos (AG's), que são provavelmente o tipo mais conhecido de programação evolucionária, são definidos como técnicas de otimização estocásticas, que imitam matematicamente os mecanismos de evolução natural das espécies, compreendendo

processos da genética das populações, da sobrevivência e adaptação dos indivíduos (GEN & CHENG, 1997).

A otimização estocástica designa a família de técnicas de otimização na qual o espaço de busca de soluções é “vasculhado” através da geração de candidatos à solução. Devido a essa natureza estocástica, não há garantia que o ótimo global seja obtido utilizando-se AG's, porém a aplicação da técnica, em diversos tipos de problemas, apresenta uma alta taxa de sucesso na obtenção de soluções.

O algoritmo genético tem o seu método inspirado na natureza. O método busca simular os processos naturais de evolução, aplicando a ideia darwiniana de seleção. Ele codifica uma solução potencial para o problema com genes em um cromossomo (também denominado indivíduo) e aplicando operadores genéticos de seleção, tais como o cruzamento e a mutação, são selecionados os melhores indivíduos da população (WHITLEY, 1993).

Na comunidade da computação evolucionária, não existe uma definição de algoritmos genéticos aceito por todos. Goldberg (1989) *apud* Câmara Júnior (2005) define AG como um “algoritmo de busca baseado nos mecanismos de seleção natural e genética”. Whitley (1993) define como “uma família de modelos computacionais inspirados na evolução” e Beasley *et al.* (1993) definem como “modelos adaptativos que podem ser usados para resolver problemas de busca e otimização”.

Os AG's possuem grande destaque como técnica de otimização por possuírem características particulares que combinam procedimentos de busca direcionada e aleatória. Segundo Câmara Júnior (2005), os AG's diferem dos métodos tradicionais de busca e otimização principalmente nos seguintes aspectos:

- inicia-se a busca a partir de um conjunto de soluções alternativas e não simplesmente de um único ponto;
- utilizam-se regras de transição probabilísticas e não determinísticas;
- a otimização dos problemas é realizada através de variáveis discretas;
- são resistentes à queda nas armadilhas de ótimos locais; e
- podem ser empregados em grande variedade de problemas de otimização.

Para uma melhor compreensão do algoritmo genético, alguns conceitos e operadores devem ser individualmente descritos.

- **Indivíduo ou cromossomo**

Na implementação do algoritmo, cada indivíduo representa uma alternativa de solução. Os indivíduos são identificados por caracteres concatenados fornecidos, inicialmente, de forma aleatória, por um conjunto de números binários de comprimento finito, convenientemente escolhidos para representar o espaço paramétrico (BRANT *et al.*, 2001).

O comprimento de cada indivíduo é fornecido pela equação:

$$r = vn * ne \quad (3.76)$$

na qual:

r = comprimento do indivíduo

vn = quantidade de variáveis de decisão

ne = número de dígitos que identifica a variável

Na Figura 3.21 é representado, com exemplo, um indivíduo para a resolução de um problema com 4 variáveis ($vn = 4$), onde cada variável possui 8 opções de resposta, ou seja, cada variável deve ser representada por 3 binários ($ne = 3$). Assim, o indivíduo possui 12 binários ao todo ($r = 4 * 3 = 12$).

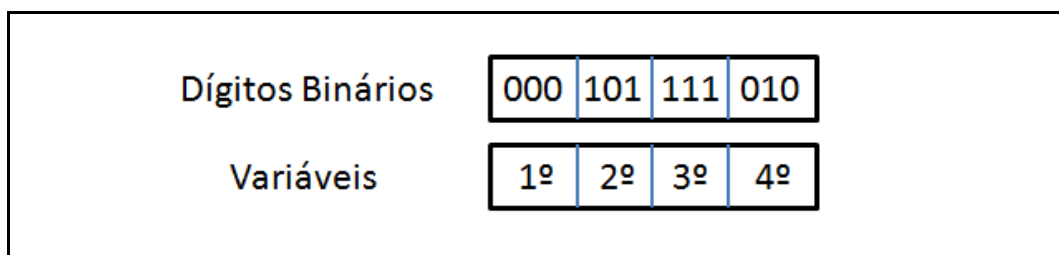


Figura 3.21 – Representação esquemática de um indivíduo no algoritmo genético

- **População**

População é o conjunto de indivíduos gerados no processo de otimização, sendo que o tamanho da população é determinado pela complexidade do problema a ser resolvido, ou seja, pela quantidade de variáveis existentes na formulação do problema em questão. Com uma

pequena população, o desempenho final e a eficiência do algoritmo podem cair, pois, desse modo, os indivíduos cobrem um menor espaço de busca da solução do problema. Já uma população com uma grande quantidade de indivíduos fornece uma maior cobertura do domínio do problema, além de prevenir uma convergência prematura para soluções locais ao invés de globais.

- **Geração**

Para cada interação do método do algoritmo genético os indivíduos da população se encontram em uma mesma geração, sendo que os melhores indivíduos, aqueles que obtiveram uma melhor resposta para a função objetivo, serão os progenitores da próxima geração de indivíduos e os indivíduos restantes serão descartados.

- **Função objetivo**

O problema em questão deve ser matematicamente equacionado, possuindo uma função objetivo dependente das variáveis em questão. A função objetivo imposta ao processo de otimização rege, acompanha e delimita a busca pela solução do problema, pois impõe um valor numérico ao resultado de cada interação no processo de otimização, espelhando o comportamento do indivíduo diante do processo como um todo (BRANT, 2002).

A função objetivo é proposta de tal forma que a sua maximização, ou minimização, resulta na melhor solução para o problema em questão. Indivíduos ou soluções que tendem a um ótimo devem possuir uma função objetivo maior do que os indivíduos que não convergem para uma solução ótima.

- **Restrições**

A limitação do espaço de busca das soluções é determinada pela imposição de restrições ao modelo. As restrições buscam descrever, através de equacionamento matemático, condições diversas para as alternativas de soluções geradas, onde cada solução proposta para o problema deve atender a todas as restrições impostas.

Uma fácil maneira de evitar que a solução ótima encontrada não atenda a uma restrição imposta é a aplicação do método de punição sobre cada indivíduo infrator, onde a penalidade reflete diretamente em sua avaliação na função objetivo e em sua gravidade quanto ao não atendimento da restrição. As restrições podem ter diferentes pesos na penalidade sob o

indivíduo e essa diferenciação é de grande valia quando restrições muito severas punem toda a população. Entretanto, esse método pode abrir precedente para selecionar indivíduos infratores como progenitores. Portanto, as funções de penalidades e as restrições devem ser modeladas com bons critérios.

Mas, de uma maneira geral, quanto menor for o número de penalidades, melhor será a função objetivo do indivíduo, tornando-o mais apto na possibilidade de sobrevivência e na contribuição para a próxima geração.

- **Operadores genéticos**

Buscando uma próxima geração mais apta ao problema proposto, o algoritmo genético aplica operadores de seleção, cruzamento e mutação.

Seleção

A seleção é um operador genético utilizado no algoritmo que se aproxima com o mecanismo de seleção natural, em que um indivíduo mais apto é usado com progenitor para um número de indivíduos da geração seguinte de acordo com o valor de sua função objetivo. Ou seja, quanto maior o valor da função objetivo para o indivíduo em questão, maior será o número de seus descendentes.

O número de indivíduos que serão selecionados como progenitores da geração seguinte em relação à população atual é um parâmetro de entrada no modelo. Indivíduos que não são escolhidos como progenitores são automaticamente desconsiderados na linha evolutiva das gerações, não interferindo na formação de futuros indivíduos que possuiriam uma função objetivo inferior caso esses indivíduos fossem selecionados.

Cruzamento

É o operador para a criação de novos indivíduos, ou seja, novas soluções candidatas, através da recombinação dos melhores indivíduos atuais. O cruzamento entre cada par de soluções pode ocorrer a uma dada probabilidade definida inicialmente.

O cruzamento pode ocorrer ao longo de todo o comprimento do indivíduo. A posição do ponto de cruzamento é obtida aleatoriamente, tendo probabilidade de ocorrer ao longo de todo o indivíduo em mais de um local. Na Figura 3.22 representa-se esquematicamente o cruzamento entre dois indivíduos.

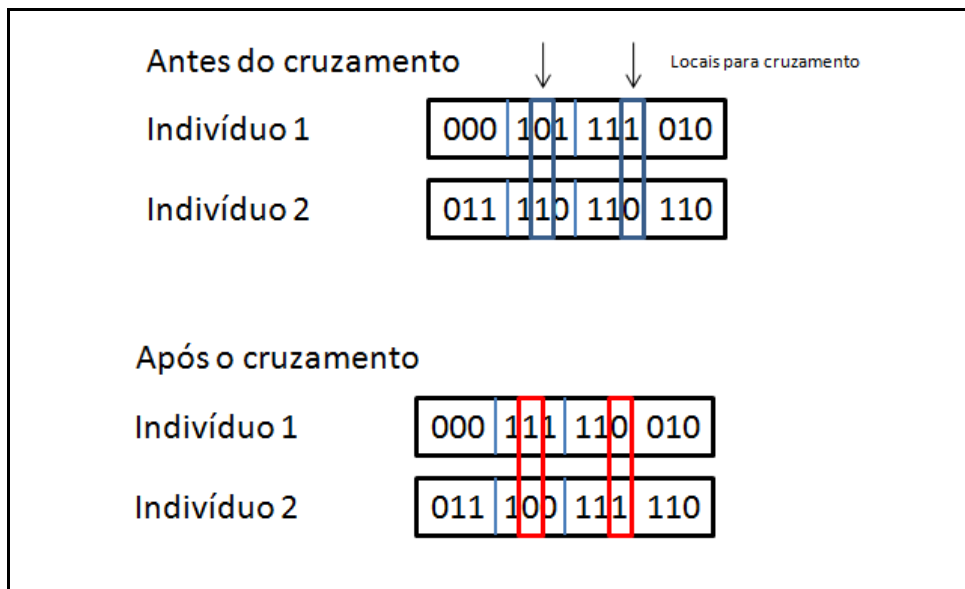


Figura 3.22 – Representação do processo de cruzamento entre dois indivíduos em um algoritmo genético

De uma maneira simplificada o cruzamento nada mais é do que a troca dos valores binários entre os indivíduos no local de cruzamento.

Mutação

A mutação é o operador que tem como objetivo principal a recuperação de boas características eventualmente perdidas pelos indivíduos. Ela simplesmente altera arbitrariamente o valor binário em certas posições do indivíduo, passando o valor 0 para 1 ou o valor 1 para 0. Esse operador genético evita que alguma combinação de solução possa passar sem ser testada na função objetivo.

Goldberg (1989) *apud* Câmara Júnior classifica a mutação como um operador coadjuvante no processo de otimização, evitando que algum material genético, potencialmente benéfico à melhoria da função objetivo, pudesse passar despercebido pelas operações de seleção e cruzamento.

Na Figura 3.23 representa-se um processo típico de mutação.

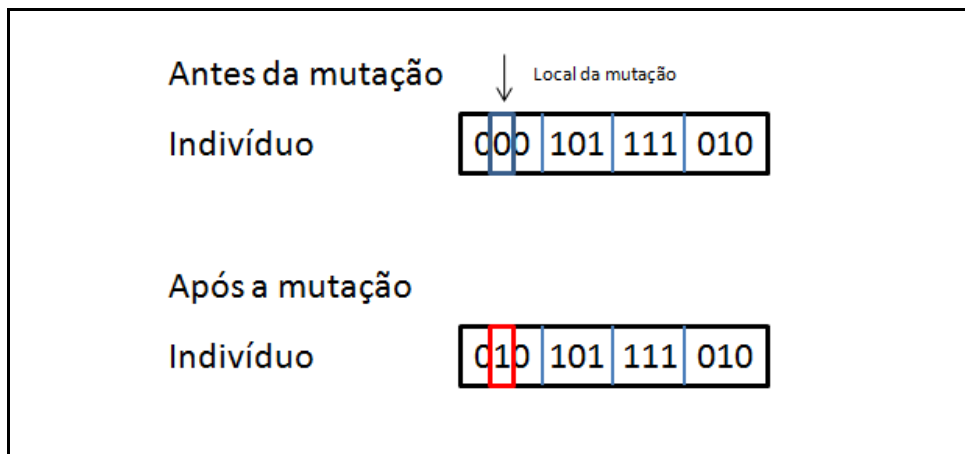


Figura 3.23 – Representação do processo de cruzamento entre dois indivíduos no algoritmo genético

Na Figura 3.24 mostra-se um fluxograma de um algoritmo genético simplificado, contendo os princípios básicos de evolução da população de indivíduos através do tempo, a aplicação do critério de seleção dos indivíduos mais bem adaptados e dos operadores de cruzamento e de mutação.

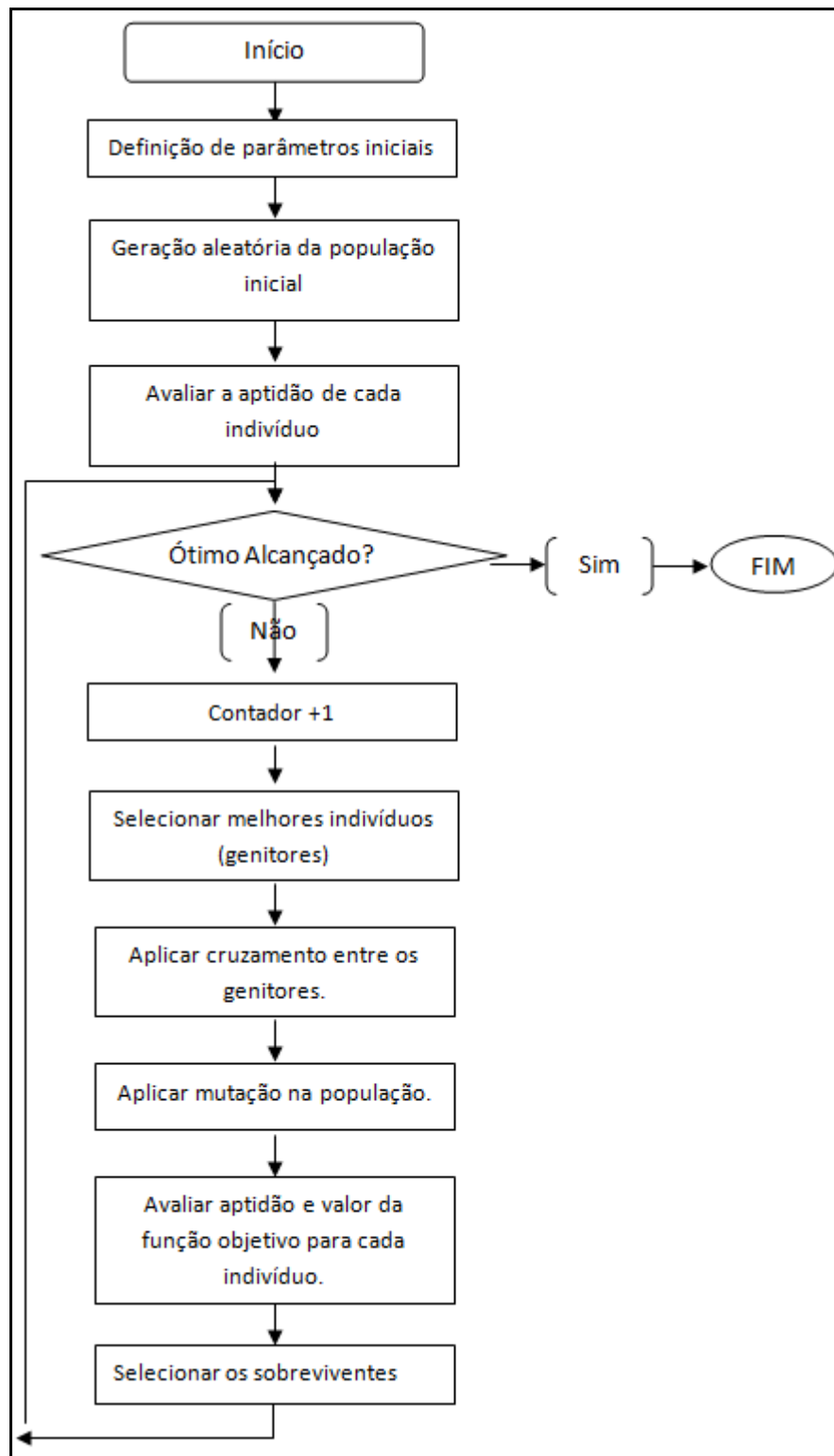


Figura 3.24 – Fluxograma geral do algoritmo genético

O primeiro passo no algoritmo genético é gerar aleatoriamente uma população de soluções candidatas, onde cada solução, chamada de indivíduo, representa uma alternativa de solução do problema em questão. A partir dos indivíduos são calculados os valores das funções objetivo, buscando a sua otimização por meio dos operadores genéticos de seleção.

O ótimo é alcançado quando a diferença entre o valor da função objetivo associado ao melhor indivíduo da geração anterior é menor, com precisão previamente estabelecida, do que o equivalente para o melhor indivíduo da geração atual. Entretanto, quando a probabilidade de não mudança (por meio do cruzamento e da mutação dos sobreviventes) do melhor indivíduo anterior for maior do que zero, existe a possibilidade que o melhor indivíduo da geração atual seja igual ao da geração anterior. Isso resultará em uma diferença entre as interações igual a zero, terminando o processo. Para isso ser evitado é utilizado o inverso do complementar da probabilidade de não mudança, determinando assim um número mínimo de interações que deve ser excedido antes do término das interações. A equação a seguir é a transcrição matemática da formulação do número mínimo de interações:

$$n_{\min} = \frac{1}{(1 - P_{\text{cruzamento}}) * (1 - P_{\text{mutação}}) * Taxa_{\text{sobreviventes}}} \quad (3.77)$$

na qual:

$P_{\text{cruzamento}}$ = probabilidade de cruzamento

$P_{\text{mutação}}$ = probabilidade de mutação

$Taxa_{\text{sobreviventes}}$ = taxa de sobrevivência da população

Aplicações de algoritmo genético

Os algoritmos genéticos possuem uma larga aplicação em muitas áreas científicas, entre as quais podem ser destacadas:

- otimização de parâmetros em funções matemáticas;
- otimização combinatória;
- otimização de planejamento;
- otimização de rotas de veículos;
- sínteses de circuitos elétricos; e
- produção industrial.

Na área de recursos hídricos os AG's possuem aplicação em, por exemplo:

- modelagem chuva-vazão (DINIZ, 2008);
- método Muskingum (PALMIER & NAGHETTINI, 2001);
- rede de abastecimento de água (BRANT, 2001); e
- irrigação (CÂMARA JÚNIOR & PALMIER, 2005).

Segundo Michalewicz *et al.* (1996), técnicas computacionais de evolução representam um grande potencial de avanço em atividades de engenharia. A sua capacidade em fornecer soluções próximas às ótimas permite, de acordo com critérios estabelecido no modelo, uma escolha ótima. Algoritmos evolucionários podem ser eficientes devido a sua grande flexibilidade e relativamente fáceis em hibridizar com domínios heurísticos.

Não foi encontrada na literatura nenhuma aplicação no processo de otimização de leis de manobras de comportas da eclusa de navegação. Vislumbrou-se vantagens na aplicação dos AG's neste caso face, dentre outras razões, à possibilidade de adaptar a geração de indivíduos que representem leis de manobras buscando o atendimento de restrições e alcançando uma lei ótima.

3.5 Uso de modelos físicos

Outra importante frente de pesquisa é o uso de modelos físicos para aumentar o conhecimento do comportamento hidráulico de eclusas de navegação. A complexidade dos sistemas de enchimento e esgotamento de eclusas é tal que se torna difícil fazer uma análise precisa dos fenômenos hidráulicos envolvidos e, por esse motivo, a utilização de modelos físicos é, muitas vezes, imprescindível para a obtenção de um projeto viável.

Apesar do desenvolvimento da modelagem numérica, que vem contribuindo significativamente para o desenvolvimento dos projetos de eclusas, os modelos físicos podem antecipar certas características do comportamento hidráulico do sistema de enchimento e de esgotamento de eclusas de navegação, como curvas características do enchimento e do esgotamento, pressões mínimas, médias e instantâneas a jusante das comportas de enchimento e de esgotamento e os esforços de amarração.

Segundo Freeman (1929) *apud*. Tondowski (1987), já em 1923 e 1924 eram utilizadas comparações entre resultados de modelo físico na escala de 1:50 e o protótipo da eclusa de Steenhock, na Holanda, os resultados da época já alcançavam diferenças médias da ordem de 3,5% nas observações dos níveis de água, vazão e inclinação do plano de água. As primeiras experiências norte-americanas na comparação dos resultados entre modelo físico e protótipo foram efetuadas na eclusa de Wheeler, em 1936. Confrontando resultados com o modelo na escala de 1:20, as diferenças registradas foram de aproximadamente 8% para o tempo total de enchimento da câmara (GRIFFIN, 1951 *apud*. Tondowski, 1987). Esses resultados demonstram a confiabilidade dos estudos em modelos reduzidos e também indicam a presença do efeito de escala. Este último ocorre em função das diferentes características existentes entre as condições hidráulicas do modelo físico e do protótipo.

Para que dois escoamentos sejam considerados semelhantes, é necessário que sejam geometricamente, cinematicamente e dinamicamente semelhantes. A semelhança geométrica existe quando a relação entre todas as dimensões lineares (comprimento, profundidade e largura) dos sistemas permanecem iguais. A semelhança cinemática ocorre quando a relação entre as componentes da velocidade e a da aceleração (no eixo x, y e z), em pontos homólogos de dois sistemas geometricamente semelhantes, permanecem constantes. A semelhança dinâmica entre dois sistemas de escoamento, esses geométrica e cinematicamente semelhantes, ocorre quando as relações entre as forças homólogas (de pressão, de viscosidade, gravitacionais) nos dois sistemas permanecem constantes.

Em um fluido incompressível, a variação de pressão não afetará a densidade do fluido, podendo-se aumentar ou diminuir o campo de pressões sem se alterar o escoamento. Uma vez que o escoamento no modelo físico pode ser considerado como uma miniaturização do escoamento do protótipo, as equações específicas necessárias para descrição do escoamento também descreverão o escoamento no modelo.

A condição de semelhança mecânica é obtida entre protótipo e modelo físico quando o número de Froude é respeitado, ou seja:

$$\mathfrak{S}_p = \left(\frac{V}{\sqrt{gL}} \right)_p = \left(\frac{V}{\sqrt{gL}} \right)_m = \mathfrak{S}_m \quad (3.78)$$

Com a equação 3.78 são obtidas as principais relações de escalas:

- velocidade = $\lambda^{1/2}$
- vazões = $\lambda^{5/2}$
- tempo = $\lambda^{1/2}$
- força = λ^3

O estudo com modelos físicos tem sido utilizado ao longo das décadas, como, por exemplo, McNown (1967), que, analisando o comportamento hidráulico, ressalta que o período crítico do enchimento da câmara da eclusa ocorre durante os estágios iniciais da manobra, quando o nível da água é baixo e a probabilidade de cavitação é alta.

Tanto no exterior como no Brasil ainda há a necessidade de estudos com modelos físicos. Serret *et al.* (2008) realizaram um estudo do comportamento de eclusas em modelo físico para analisar o funcionamento da solução projetada para uma nova eclusa no porto de Sevilha, na Espanha. O objetivo do estudo foi analisar o comportamento hidráulico dos condutos de enchimento e esvaziamento, determinar os tempos requeridos para a manobra, e avaliar a variação do fluxo e pressão nos condutos.

A finalidade dos ensaios náuticos no modelo físico foi analisar os movimentos da embarcação na eclusa durante as manobras de enchimento e esvaziamento, assim como determinar a ação do vento, conforme ilustrado nas Figuras 3.25 e 3.26. Serret *et al.* (2008) observaram que os níveis de água na eclusa não foram uniformes, sendo que no princípio o nível aumenta mais rapidamente perto da comporta de saída e em seguida ao longo da região oposta, produzindo, assim, uma oscilação.



Figura 3.25 – Panorama do modelo físico da nova eclusa de Sevilha
Fonte: Serret *et al.* (2008)

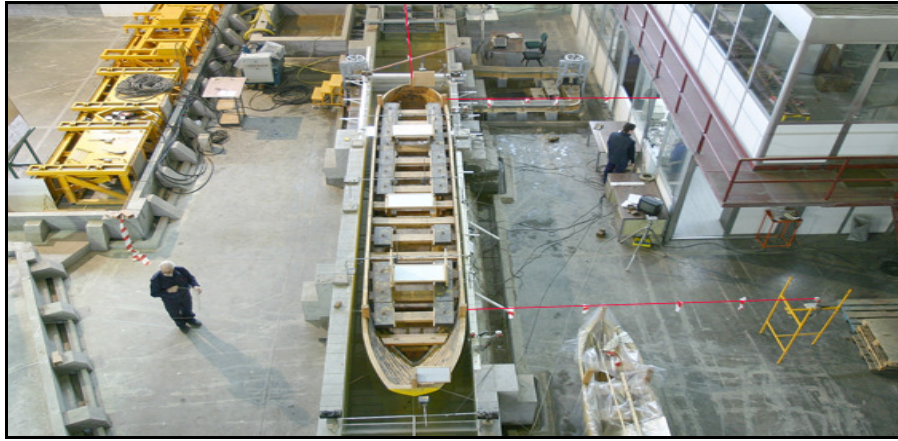


Figura 3.26 – Ensaios em modelo do modelo físico da nova eclusa de Sevilha
Fonte: Serret *et al.* (2008)

No Brasil, Santos (1993), utilizando um modelo físico, constituído de um canal de aproximação e dos circuitos hidráulicos que compõem uma eclusa de navegação, desenvolveu estudos para a determinação de critérios operacionais para a obtenção de profundidades mínimas de eclusas. Visou-se uma otimização da operação de entrada e saída de embarcação a jusante para diminuir o tempo de trânsito das mercadorias transportadas, buscando, assim, uma redução do custo final dos produtos e um aumento de competitividade.

O modelo utilizado foi o da câmara da eclusa do aproveitamento hidrelétrico Engenheiro Souza Dias (Jupiá), na escala geométrica de 1:25, conforme a planta da Figura 3.27. Os dados básicos adquiridos durante o movimento da embarcação e da água se resumem em:

- registros da posição do comboio no tempo;
- variação do nível da água na câmara; e
- fluxo no sistema de restituição da câmara.

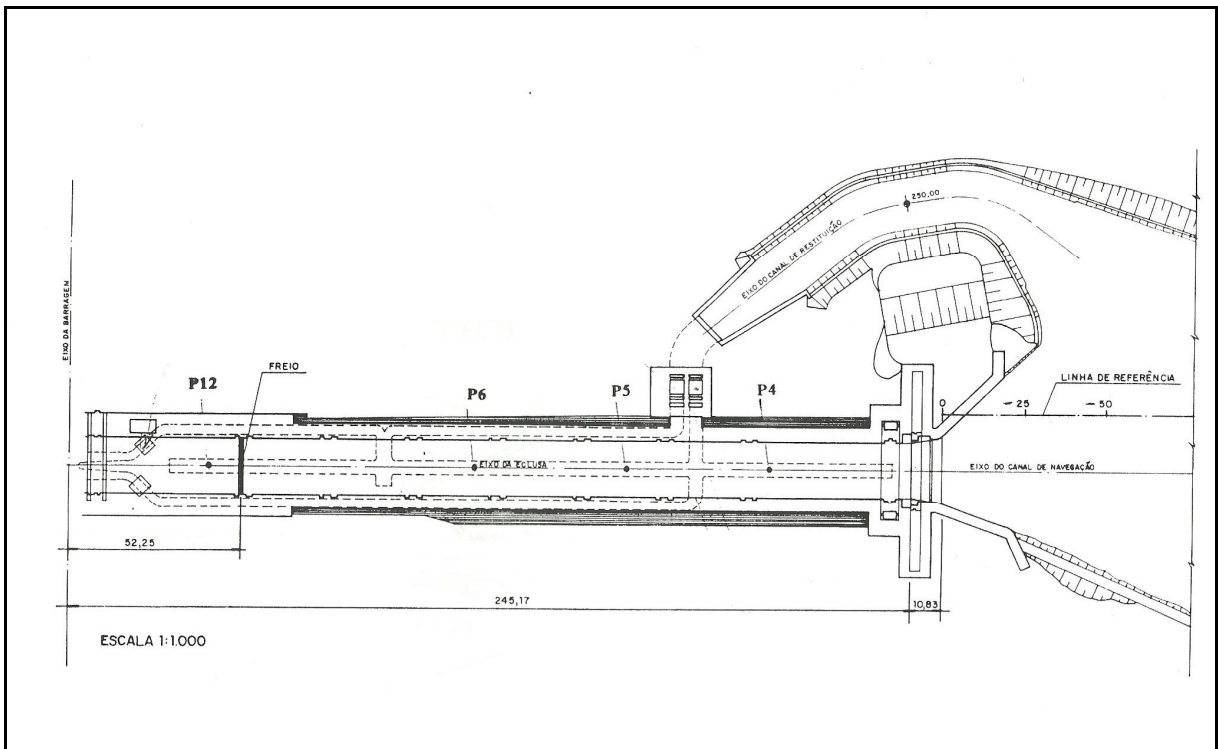


Figura 3.27 – Planta do modelo físico de Jupirá
 Fonte: Santos (1993)

Ronsi *et al.* (1988) definiram os aspectos operacionais de enchimento e esvaziamento das eclusas 1 e 2 de Tucuruí por meio de investigações em modelos físicos na escala de 1:25, focando diretamente os problemas relacionados com as válvulas de enchimento e esvaziamento nos seguintes aspectos hidráulicos:

- dissipação de energia e condições de pressão a jusante;
- turbulências e flutuações de pressão;
- contração e expansão do jato;
- cavitação e aeração do escoamento; e
- tempo de enchimento e esvaziamento.

Durante as investigações realizadas chamou a atenção o problema de formação de vórtices nos poços das válvulas, recirculação e engolimento de ar, quando colocadas a operar nas condições mais críticas, ou seja, com desníveis máximos e manobras emergenciais. Na Figura 3.28 apresenta-se de forma qualitativa a formação de vórtices, problema que pode ser solucionado por meio de dimensionamento adequado nos sistemas de enchimento e esvaziamento das eclusas, procurando-se evitar as situações que elevem em excesso as velocidades dos escoamentos.

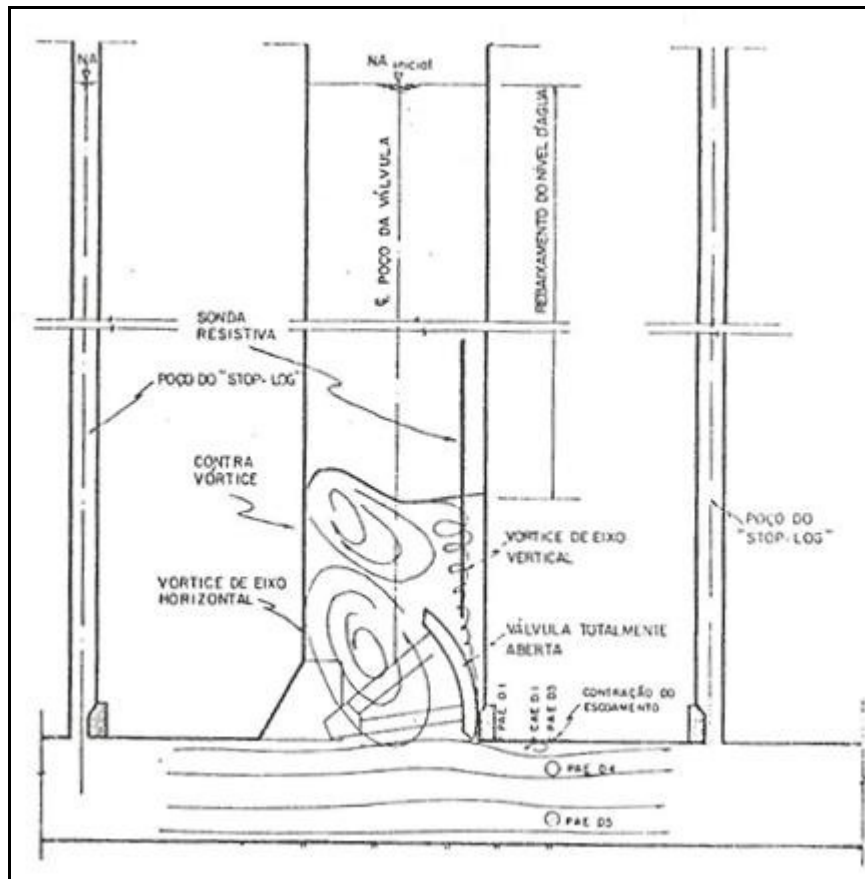


Figura 3.28 – Formação de vórtices junto à válvula
 Fonte: Ronsi *et al.* (1988)

Devido à grande importância dos estudos de modelos físicos, em caráter mundial e nacional, serão apresentados nos próximos itens detalhes do modelo físico das novas eclusas do canal do Panamá e seus respectivos modelos matemáticos. E no contexto do corpo da dissertação também serão apresentados detalhes da eclusa do LAHE, eclusa essa que subsidiou os dados necessários para calibração dos modelos matemáticos desenvolvidos.

3.5.1 Eclusas do canal do Panamá

O Canal do Panamá une os Oceanos Atlântico e Pacífico. Ele tem seus limites na cidade de Colón, na costa do Mar do Caribe, e na Cidade do Panamá, na costa do Oceano Pacífico. A zona do canal atravessa três lagos artificiais: Gatun, Miraflores e Madden. O canal possibilita 144 rotas marítimas para mais de 80 países diferentes.

O aumento de trânsito pelo canal fez surgir o projeto de sua ampliação promovido pelo governo panamenho. O projeto engloba a construção de um conjunto de eclusas constituído

por 3 cubas auxiliares para cada câmara de navegação. Na Figura 3.29 representa-se esquematicamente o projeto das cubas para as eclusas.

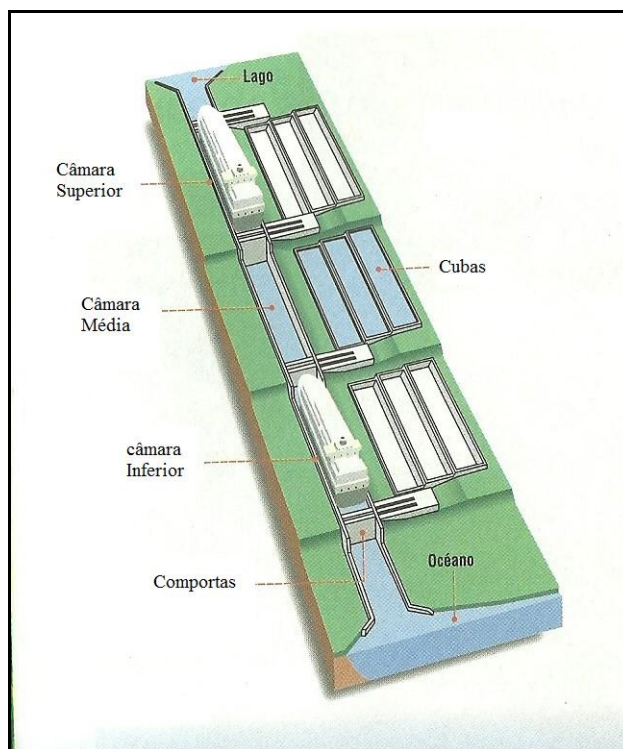


Figura 3.29 – Eclusas do projeto de ampliação do canal do Panamá
Fonte: Wong (2008)

O projeto está fundamentado em modelos numéricos e físicos para o desenho e concepção do sistema de enchimento e esvaziamento e navegação do novo sistema de eclusas. Os modelos numéricos buscam a otimização dos sistemas de enchimento e esvaziamento e o modelo físico objetiva a validação do sistema.

Os modelos numéricos utilizados para a aplicação das novas eclusas do canal do Panamá são o LOCKSIM, para a análise de enchimento e esvaziamento da câmara de navegação (Figura 3.30) e das cubas auxiliares, modelos 2D, para a otimização das geometrias dos emboques dos canais (Figura 3.31), e modelos 3D, para o estudo da geometria do canal de aproximação (Figura 3.32).

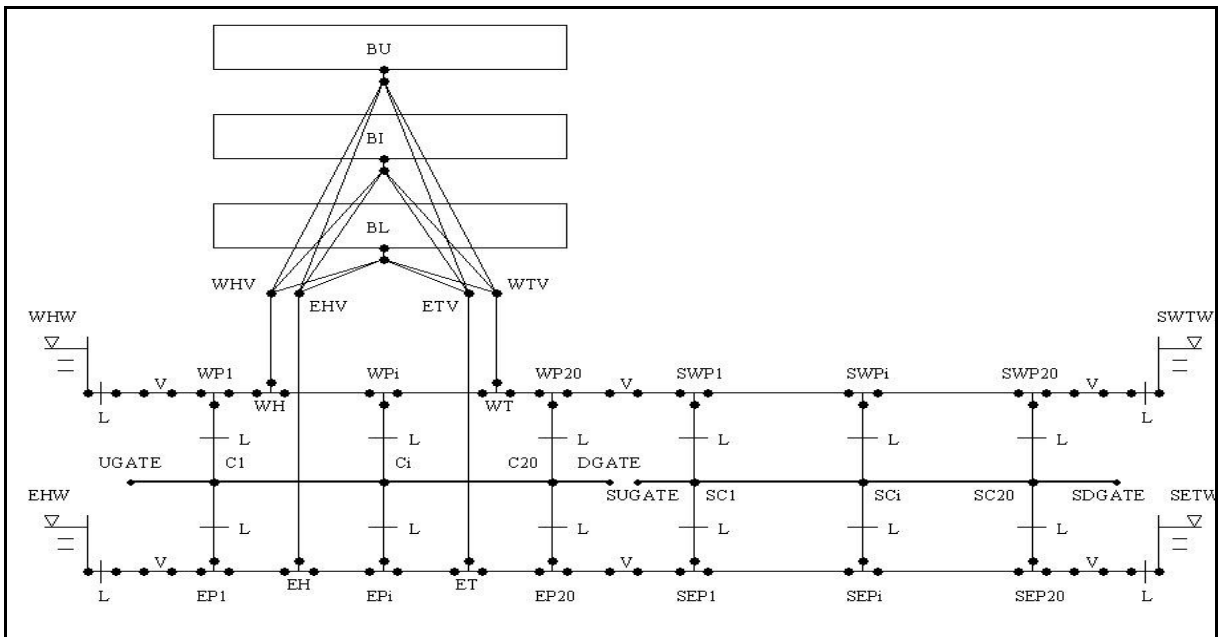


Figura 3.30 – Esquema aplicado ao LOCKSIM para simulação das novas eclusas do canal do Panamá
 Fonte: ACP (2005)

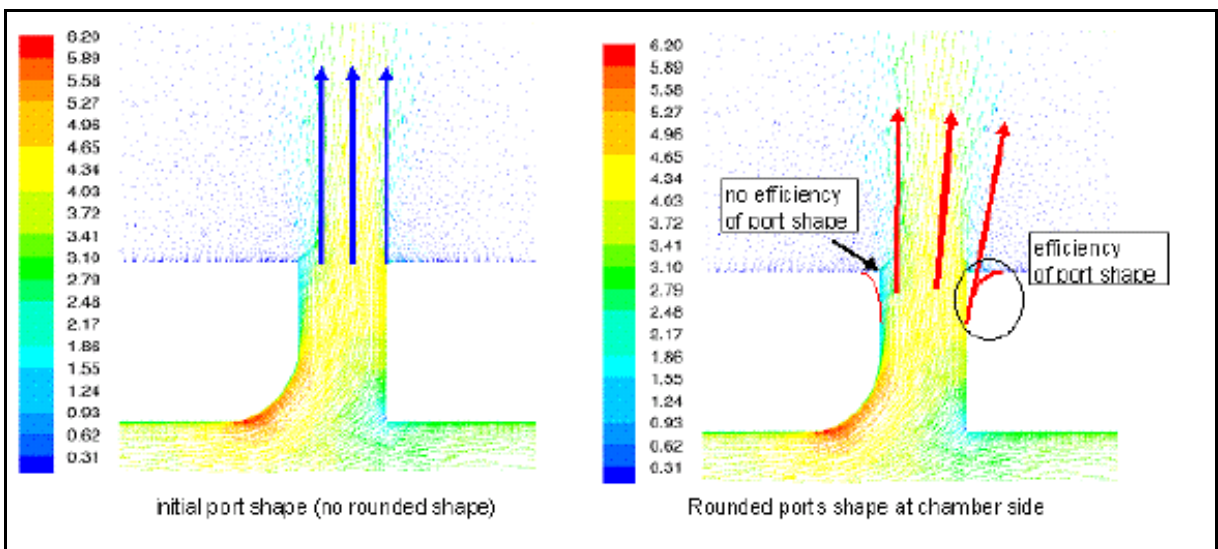


Figura 3.31 – Modelo 2D para otimização dos emboque dos canais
 Fonte: ACP (2007)

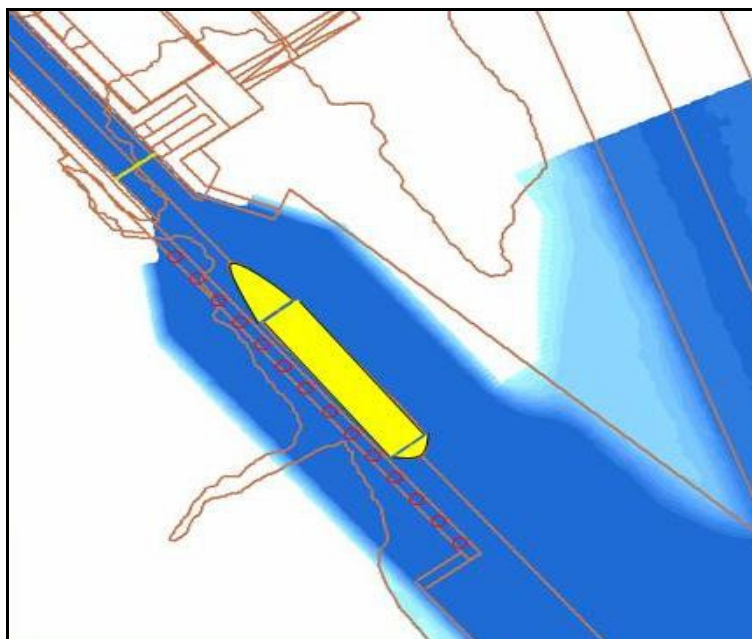


Figura 3.32 – Modelo 3D para estudo da geometria do canal de aproximação
Fonte: Wong (2008)

Os objetivos da construção do modelo físico para a construção do novo sistema de eclusas constituintes de 3 cubas no canal do Panamá são:

- validar o sistema de enchimento e esvaziamento selecionados pelos modelos numéricos;
- otimizar elementos dos sistemas hidráulicos; e
- obter dados hidráulicos das manobras de operação (tempo de enchimento e esvaziamento, força de amarração, pressões e velocidades).

A escala adotada do modelo físico é de 1:30. Considerando as relações para as grandezas físicas em modelos de escala reduzida, com base na semelhança mecânica e com o uso da lei de Froude, as dimensões do modelo reduzido adotadas foram:

- câmara da eclusa: 15,3 m de comprimento por 1,8 m de largura;
- Velocidade da água nos condutos: 1,3 m/s;
- Descarga: 100 l/s; e
- Tempo de enchimento-esvaziamento: 2 minutos

A Figura 3.33 ilustra em foto e esquema comparativo o modelo físico construído para as alterações da eclusa do canal do Panamá.

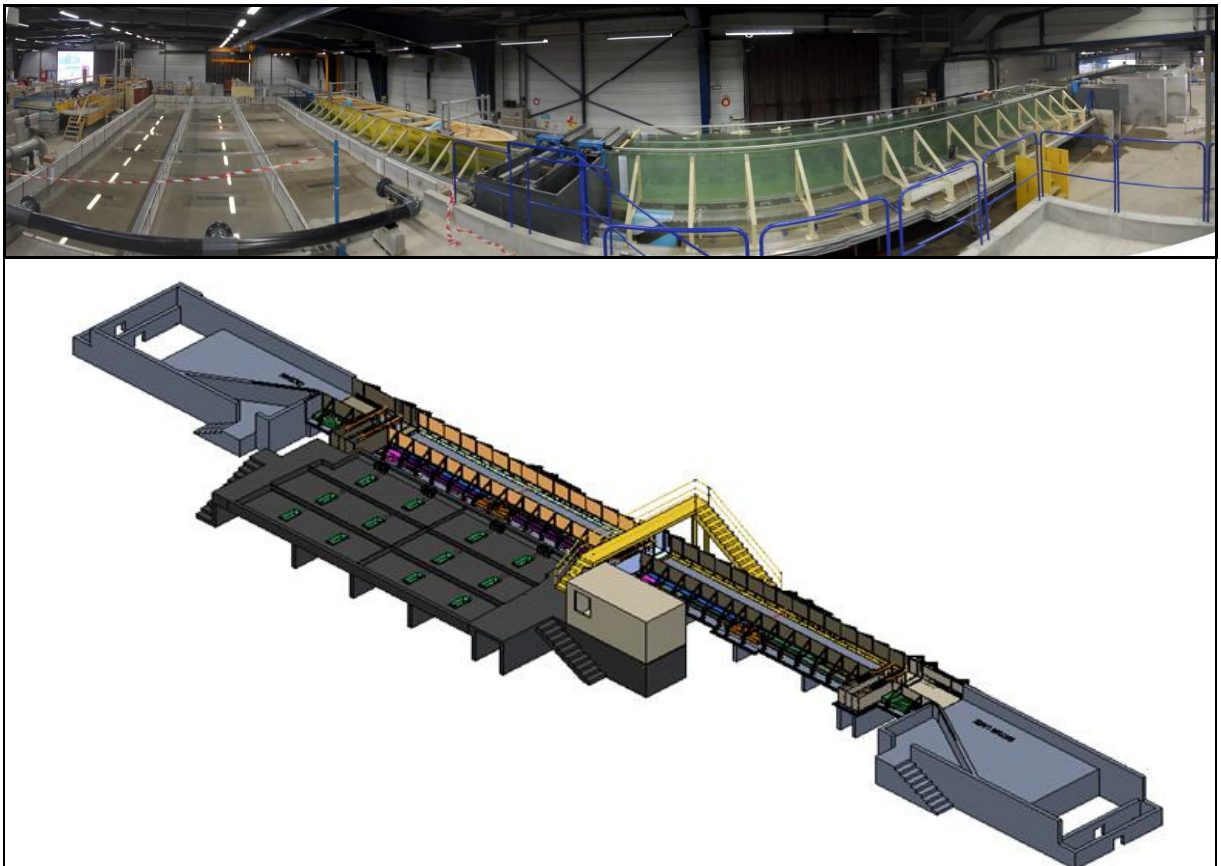


Figura 3.33 – Modelo físico e esquema do novo sistema de eclusas do canal do Panamá
Fonte: CPP (2008)

O modelo físico foi construído para avaliar o comportamento hidráulico do sistema do lado do Pacífico, onde as condições de contorno são mais complexas (maior amplitude de variação de elevação do nível da água) comparadas ao lado do Atlântico. Entretanto, os sistemas são os mesmos em ambos os lados, sendo a única diferença a cota de elevação da soleira de bloqueio da eclusa.

Na Figura 3.34 é apresentada a comparação dos resultados da evolução do nível de água e do hidrograma de vazões obtidos por Re *et al.* (2010) para ensaios em regime não permanente no modelo físico e no modelo matemático.

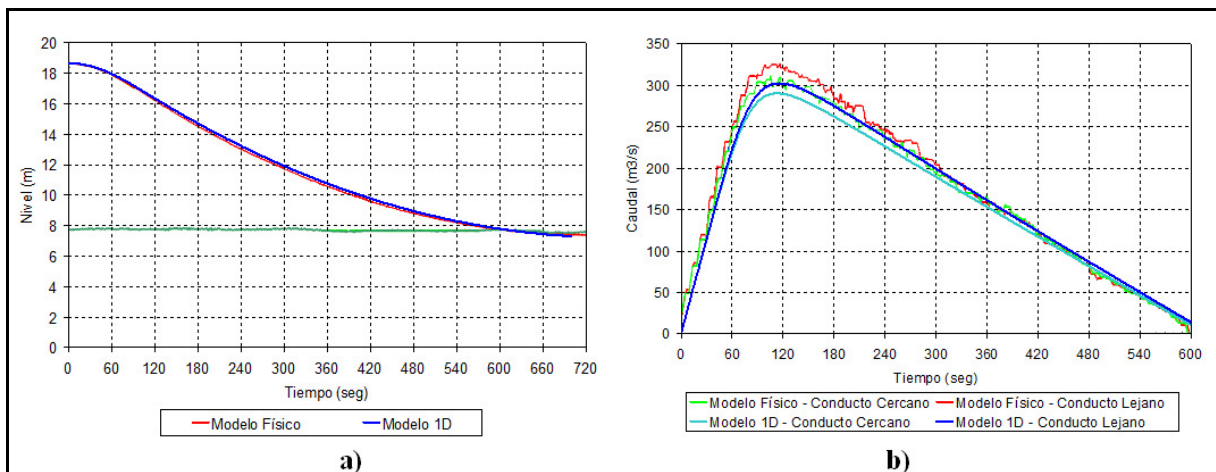


Figura 3.34 – a) Evolução do nível na câmara durante esgotamento. b) Hidrograma de vazão

Uma vez calibrado o modelo matemático os resultados obtidos foram bastante satisfatórios para todas as condições de operações do projeto.

3.5.2 Modelo físico do LAHE

Esta dissertação está inserida no projeto de pesquisa e desenvolvimento sobre análise do comportamento hidráulicos dos sistemas de enchimento e esgotamento de eclusas de navegação que vem sendo desenvolvido com o apoio de FURNAS Centrais Elétricas. O projeto é desenvolvido em parceria com o Laboratório de Hidráulica Experimental e Recursos Hídricos (LAHE/RJ) de FURNAS, o Departamento de Engenharia Hidráulica e Recursos Hídricos da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG) e o Instituto de Pesquisas Hidráulica (IPH) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Um dos principais objetivos do LAHE e do IPH é apresentar a configuração das perdas de carga no regime de enchimento/esvaziamento de uma eclusa de alta queda, visando identificar padrões de comportamento e fornecer subsídios para simulações experimentais e numéricas a serem realizadas pela Universidade Federal de Minas Gerais.

A eclusa, construída no laboratório do LAHE, representa as características básicas normalmente encontradas em uma eclusa de média/alta queda, identificadas a partir das eclusas existentes ou em fase de projeto, com maior aplicabilidade para a atual realidade dos empreendimentos hidrelétricos do Brasil. As dimensões adotadas enfocam principalmente

diversos projetos de usinas hidrelétricas que serão desenvolvidos na bacia amazônica e exigirão a transposição de nível através de eclusas de navegação.

No modelo físico podem ser realizados ensaios em regime permanente e não-permanente, subsidiados por medições simultâneas de uma grande quantidade de grandezas distintas. A análise do comportamento hidráulico da eclusa foi baseada na determinação das seguintes características:

- tempo de enchimento e esvaziamento da câmara para diversas condições de operação;
- velocidade do escoamento da linha de água nos condutos da eclusa;
- níveis de água na tomada de água, nos poços das comportas, no interior da câmara e no canal de restituição;
- oscilações da superfície da água no interior da câmara;
- forças resultantes nas amarras das embarcações;
- pressões instantâneas a jusante das válvulas de controle, verificação da ocorrência de cavitação; e
- níveis de água atingidos na câmara ao final do enchimento e do esgotamento e dos respectivos processos de amortecimento, minimizando ou eliminando tal efeito.

O modelo físico possui as características apresentadas na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 — Principais características do modelo físico

Parâmetro	Dimensão (m)
nível de coroamento	41,67
nível de jusante	40,29
piso do aqueduto	40,13
largura da câmara	1,36
comprimento da câmara	9,98
largura e altura da comporta	2 de 0,16

O desnível máximo na eclusa é equivalente a 1,38 m, entretanto, por questões operacionais, o máximo desnível alcançado nos ensaios realizados foi de 83 centímetros. Nas Figuras 3.35 a 3.37 são mostradas, respectivamente, as fotos da visão geral da eclusa, da comporta e do sistema de alimentação.



Figura 3.35 – Modelo físico de eclusa do LAHE

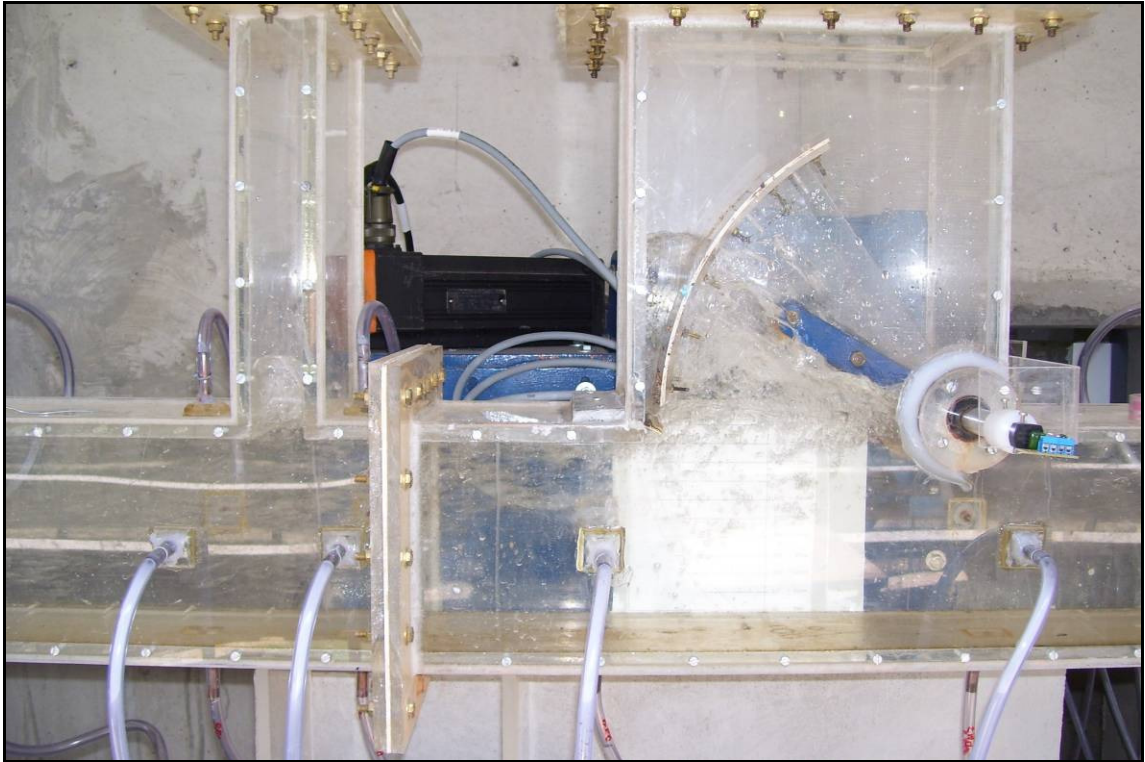


Figura 3.36 – Comporta do tipo tainter do modelo físico



Figura 3.37 – Sistema de alimentação da câmara do modelo físico

Nas Figuras A.3 a A.5 no Anexo 2 estão representadas as características e dimensões dos aquedutos, do sistema de distribuição e a localização das tomadas piezométricas cedidas por Furnas pelo projeto P&D Eclusas de Navegação.

4 METODOLOGIA

Os estudos de eclusas de navegação em modelos físicos são de aplicação global e consagrada, entretanto, a utilização de modelos numéricos permite descrições qualitativas e quantitativas da solução a ser adotada de uma maneira mais rápida, auxiliando um pré-dimensionamento adequado das estruturas finais.

A aplicação de um modelo numérico em um estudo de um fenômeno físico possui muitas vantagens quando comparadas com investigações em modelos físicos, tais como:

- baixo custo – a mais importante vantagem de uma aplicação de um método numérico para previsão de fenômenos físicos é o baixo custo. Na maioria dos estudos, o uso de modelagem computacional é de uma ordem de grandeza muito menor quando comparado ao custo de experimentos físicos;
- velocidade – os computadores possuem grande velocidade de cálculo e grande habilidade de adaptação de condições físicas. Diversas configurações do problema em questão podem ser facilmente inseridas em modelos numéricos;
- volume de informações – uma solução computacional de um problema pode prover valores para as variáveis relevantes (como velocidade, pressão, temperatura, concentração) dentro do domínio de interesse quando conhecidas as expressões que regem os seus comportamentos;
- simulação de condições reais – em um modelo computacional diversas condições físicas podem ser simuladas. Para um programa de computador, as dificuldades são pequenas para simular domínios de dimensões pequenas ou grandes, eventos em grande ou pequena escala de tempo; e
- simulação de condições ideais – uma modelagem numérica pode muitas vezes ser usada para estudar um fenômeno físico complexo com um foco em apenas algumas variáveis e parâmetros. Pode-se modelar o fenômeno com algumas simplificações buscando uma condição ideal que facilite a análise.

As vantagens mencionadas podem causar facilmente um grande entusiasmo para uma aplicação, entretanto, o modelo numérico, além de necessitar de um grande embasamento teórico, também necessita de uma validação e de uma profunda análise dos resultados para se ter a segurança de que os resultados possuem significado físico e de que o problema foi modelado corretamente.

Patankar (1980) classifica os problemas físicos em dois grupos:

- Grupo A:

“Problemas que possuem adequada descrição matemática com um grande embasamento teórico já conhecido, como, por exemplo: condução de calor e escoamento laminar.”

- Grupo B:

“Problemas que ainda não possuem uma adequada descrição matemática, como, por exemplo: complexos escoamentos turbulentos, líquidos não-Newtonianos e alguns escoamentos bi-fásicos.”

A análise dos escoamentos nos sistemas de enchimento e esgotamento, principalmente nas eclusas de alta queda, é bastante complexa. Com a modelagem matemática, os cálculos hidráulicos são desenvolvidos de forma representativa e detalhada, tornando possível descrições quantitativas e qualitativas mais completas dos fenômenos hidráulicos nas operações de eclusagem.

Os modelos numéricos desenvolvidos na linha de pesquisa desta dissertação podem ser divididos em duas frentes: simulação e otimização. A frente de simulação consiste em simular no modelo matemático, utilizando as equações provenientes do uso do método numérico de Runge Kutta de quarta ordem ou das equações provenientes da transformada de Laplace na equação geral do escoamento, com aplicação para leis de aberturas para a eclusa de Promissão e para o modelo físico do LAHE.

Com os dados obtidos nos ensaios realizados no modelo físico do LAHE, também foi possível comparar os dados medidos com as saídas do modelo matemático para as mesmas lei de manobra, obtendo assim a sua calibração. Com o modelo de simulação já consolidado e

calibrado a segunda frente consiste em implementar uma rotina de otimização para leis de abertura de comportas.

Existem diferentes métodos de otimização que poderiam ser utilizados, tendo sido descritas anteriormente algumas aplicações no item 3.4. Entretanto, devido à sua grande aplicabilidade na área de otimização, possuindo grande facilidade de inserção de restrições, lineares ou não-lineares, e também por trabalhar com variáveis discretas de velocidade de abertura das comportas, os AG's foram escolhidos para otimização de leis de manobra.

Com base na pesquisa bibliográfica efetuada, essa aplicação tem caráter original, visto que são poucos os estudos de otimização de leis de manobras de eclusas citados na literatura e em nenhum deles faz-se menção ao uso do AG's.

A frente de otimização foi realizada em duas etapas:

- A primeira etapa consistiu na validação do modelo desenvolvido com base na comparação de resultados obtidos por meio de modelo de otimização já consolidado disponível na literatura; e
- A segunda etapa consistiu na aplicação do modelo de otimização validado e calibrado com o uso de modelo físico, tendo sido otimizada a lei de manobra para uma eclusa de dimensões iguais ao modelo físico e com as devidas adaptações do modelo para as limitações operacionais do servo-mecanismo de abertura das comportas presentes.

4.1 Simulação hidráulica

4.1.1 Escolha do método numérico

A frente de simulação consistiu na utilização das equações de posição, velocidade e aceleração obtidas por meio da utilização do método de Runge-Kutta de quarta ordem e das equações provenientes da transformada de Laplace na equação geral do escoamento (equação 3.4).

Para uma comparação inicial do desempenho dos dois modelos foi simulada uma lei de manobra linear com tempo total de abertura em 180 segundos e permanência da abertura máxima da comporta para uma eclusa de navegação, com as seguintes características:

- cota do nível d'água de montante igual a 30 metros;
- cota do nível d'água inicial na câmara da eclusa igual a zero;
- área da comporta igual a 20 m²;
- área da câmara da eclusa igual a 6000 m²; e
- comprimento do conduto igual a 200 m.

Para a aplicação do método de Runge-Kutta e da transformada de Laplace foram desenvolvidos dois programas na linguagem C. No APÊNDICE 1 encontram-se os comandos do programa desenvolvido com a aplicação do método de Runge-Kutta e no APÊNDICE 2 os comandos para a utilização da transformada de Laplace. Ambos os programas possuem entradas de dados externos referentes aos valores de coeficientes de perda de carga. Um exemplo de arquivo é fornecido no APÊNDICE 3.

No APÊNDICE 4 são encontradas figuras que mostram um simulador desenvolvido em Visual Basic com os resultados gráficos do comportamento hidráulico da eclusa de navegação com a aplicação da transformada de Laplace e uma interface de simulação da subida da embarcação ao longo da manobra.

Por meio dessa primeira aplicação ficou evidente a sensibilidade do modelo em relação aos valores dos coeficientes de perda de carga do conduto e, especialmente, da comporta.

Coefficientes de perda de carga

A equação geral do escoamento (equação 3.4) é dependente de coeficientes de perda de carga, os quais influenciam fortemente o comportamento hidráulico durante as manobras de eclusagem. No modelo eles foram divididos em coeficientes de perda de carga a montante da comporta (k_1), na região da comporta ($k_v(t)$) e a jusante da comporta (k_2).

Os valores utilizados para os coeficientes de perda de carga foram os da eclusa de Promissão, obtidos de Themag (1987) *apud* Palmier (1990). Os valores de montante (k_1) e de jusante (k_2) utilizados foram, respectivamente, 0,376 e 1,0.

Os valores dos coeficientes de perda de carga ($k_v(t)$) para a comporta estão representados na Figura 4.1.

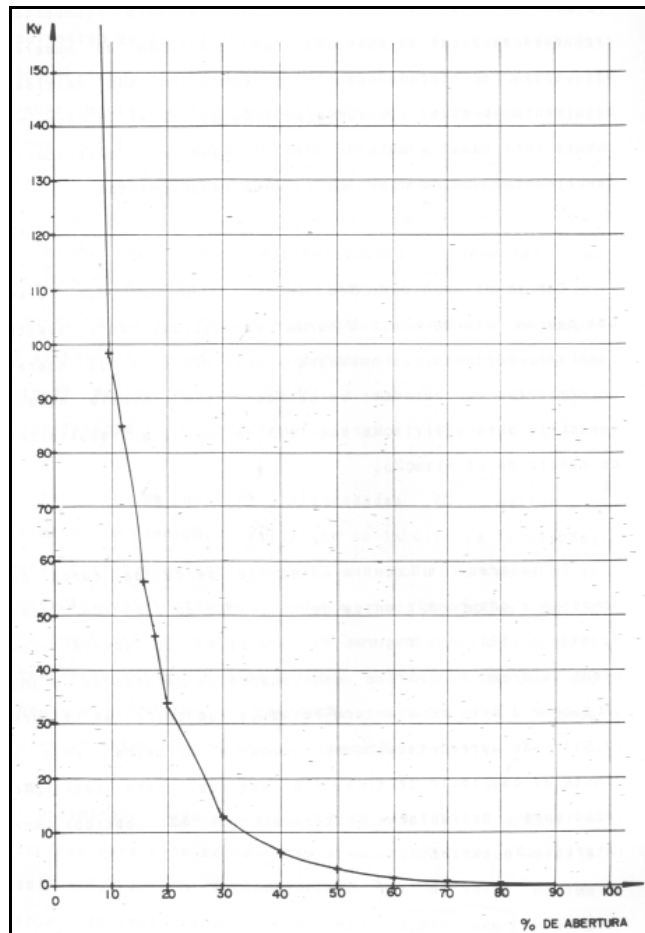


Figura 4.1 – Coeficientes de perda de carga da comporta da eclusa de Promissão
 Fonte: Palmier (1990)

Os coeficientes de perda de carga na comporta são dados em função da abertura relativa, possuindo um decaimento vertiginoso na evolução da abertura. Analisando a Figura 4.1 fica claro que quanto menor o valor da abertura da comporta maior é o valor do coeficiente de perda de carga.

Coeficientes de contração do jato na comporta

Outro importante coeficiente que influencia o comportamento hidráulico, principalmente nos condutos a jusante da comporta (região da *vena contracta*), é o de contração do jato. Como a região logo a jusante da comporta é o ponto mais crítico, com um maior efeito de cavitação, esses coeficientes são utilizados na expressão para o cálculo da pressão de cavitação.

Os valores utilizados no modelo para os coeficientes de contração do jato na comporta, ilustrados na Figura 4.2, foram obtidos por Themag (1987) *apud* Palmier (1990).

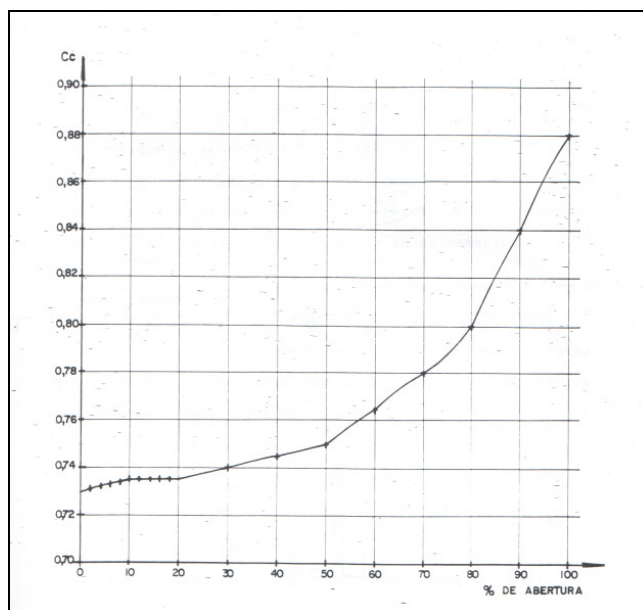


Figura 4.2 – Coeficientes de contração na comporta da eclusa de Promissão
Fonte: Palmier (1990)

Os resultados para a evolução do nível, velocidade e aceleração da água na câmara da eclusa foram muito similares, porém o modelo com melhor resultado foi o da utilização da transformada de Laplace. Os resultados serão apresentados no capítulo 5.

4.1.2 Simulação para eclusa do LAHE

Para a aplicação da transformada de Laplace para simulação do comportamento hidráulico no modelo físico na eclusa do LAHE foi desenvolvido um programa na linguagem Fortran. A partir de uma lei de manobra discretizada no tempo e dos parâmetros de entrada necessários o modelo obtém como saída a posição, a velocidade e a aceleração do nível da água na câmara da eclusa e também o índice de cavitação para a manobra aplicada.

O objetivo principal da aplicação foi a calibração do modelo desenvolvido. Para isso, primeiramente foram utilizados os dados de perda de carga obtidos no modelo físico em ensaios de regime permanente. Definidos os valores, foram realizados ensaios em regime não-permanente, nos quais as mesmas lei de manobras aplicadas na eclusa do LAHE foram aplicadas no modelo matemático para assim consolidar os valores de perda de carga adotados.

Para a correta execução do programa alguns parâmetros de entrada são necessários. No APÊNDICE 5 encontra-se um arquivo de entrada como exemplo.

Os parâmetros de entrada seguem a seguinte ordem:

Primeira linha:

- cota do nível d'água de referência (de montante para o enchimento e de jusante para o esvaziamento);
- cota do nível d'água inicial dentro da câmara; e
- cota do piso do aqueduto do sistema de enchimento ou esvaziamento

Segunda linha:

- área hidráulica do aqueduto;
- área da câmara;
- área transversal do aqueduto de montante; e
- área transversal do aqueduto de jusante.

Terceira linha:

- soma dos coeficientes de perda de carga do sistema a montante da comporta; e
- soma dos coeficientes de perda de carga do sistema a jusante da comporta.

Quarta linha:

- altura do aqueduto de jusante;
- comprimento do aqueduto de montante; e
- comprimento do aqueduto de jusante.

Quinta linha:

- diferença entre a pressão atmosférica local e a pressão de vapor de água a 20° C.

Sexta linha:

- largura da comporta;
- área da comporta;
- aceleração da gravidade; e
- velocidade inicial no aqueduto.

Sétima linha:

Na sétima linha são fornecidos os números de pontos para a discretização dos parâmetros:

- perda de carga na comporta;
- coeficiente de contração do jato na comporta; e
- índice de cavitação crítica.

Oitava linha:

A oitava linha tem como entrada os valores de discretização do tempo:

- número de espaçamentos de tempo; e
- valor de cada espaçamento de tempo (Δt).

Os valores para os três parâmetros da sétima linha (perda de carga, coeficiente de contração e cavitação crítica) são listados nas subseqüentes linhas do arquivo de entrada, sendo que sempre relacionados a um valor de abertura relativo da comporta (o valor do parâmetro em questão é posicionado na primeira coluna e a abertura relativa da comporta na segunda coluna).

Os parâmetros de coeficiente de perda de carga e de contração do jato na região da *vena contracta* são de grande importância, pois influenciam fortemente o comportamento hidráulico durante uma manobra de eclusagem. O modelo matemático possui grande sensibilidade a pequenas alterações em seus valores.

Para avaliação das perdas de carga do modelo físico do LAHE os coeficientes foram calculados com base na equação de Bernoulli, representada pela equação:

$$Z_1 + \frac{\rho V_1^2}{2g} + P_1 = Z_2 + \frac{\rho V_2^2}{2g} + P_2 + \Delta h \quad (4.1)$$

na qual:

$$\Delta h = k \frac{V^2}{2g}$$

sendo:

k = coeficiente de perda de carga do trecho

Foram realizados ensaios a partir de 4 diferentes desníveis, denominados de H1, H2, H3 e H4, sempre mantendo fixo o nível de jusante e variando o de montante, correspondendo a desníveis de, respectivamente, 0,83 cm 0,72 cm, 0,64 cm e 0,48 cm. Durante os ensaios foram realizadas medições de nível nas cubas de montante e de jusante para monitoramento dos desníveis.

Para cada um dos 4 desníveis impostos, foram realizados ensaios em regime permanente para 7 valores de aberturas de comporta distintas: 100%, 60%, 50%, 40%, 30%, 20% e 10%.

Em todas as condições de ensaios foram efetuadas medições de pressão média nos aquedutos e na câmara por meio de transdutores de pressão, somando um total de 12 distintos pontos.

A principal abordagem para a obtenção dos coeficientes de perda de carga foi a divisão do modelo físico em três trechos, conforme representado na Figura 4.3 para o regime de enchimento.

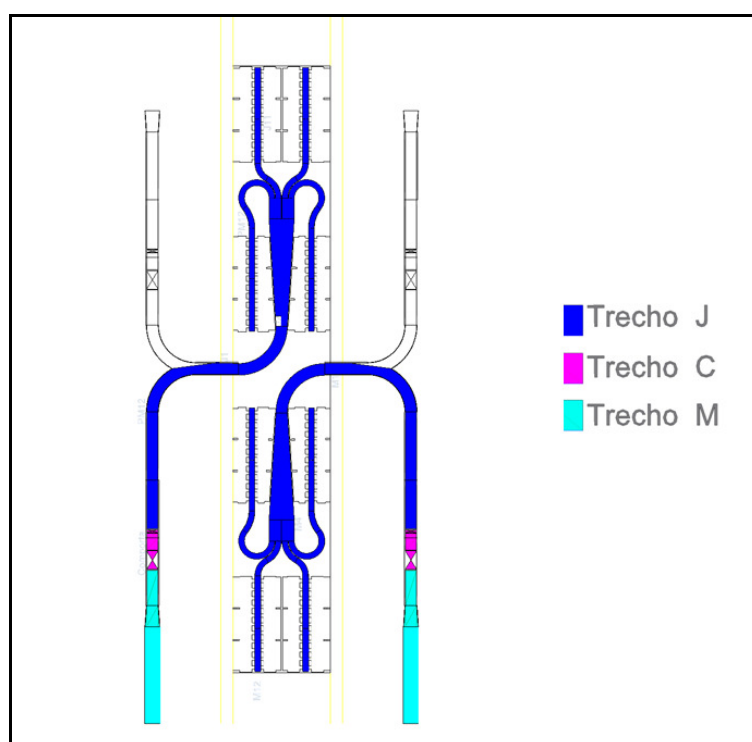


Figura 4.3 – Divisões do modelo físico para o regime de enchimento

- Trecho J:

O primeiro trecho tem como limites a cuba de jusante até a seção imediatamente a jusante da comporta. Os valores para os coeficientes finais de perda de carga estão representados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Coeficientes de perda de carga do trecho J para enchimento

Desnível H1	
Abertura	Coeficiente k
100%	2,11
60%	2,24
50%	2,37
30%	3,01
20%	3,74
10%	7,25
Desnível H2	
Abertura	Coeficiente k
100%	1,98
60%	2,23
50%	2,40
30%	2,56
20%	1,86
10%	6,56
Desnível H3	
Abertura	Coeficiente k
100%	2,05
60%	2,20
50%	2,37
30%	2,60
20%	2,92
10%	4,05
Desnível H4	
Abertura	Coeficiente k
100%	2,04
60%	2,22
50%	2,36
30%	2,33
20%	0,68
10%	3,14

- Trecho C (comporta):

A segunda parcela considerada de perdas foi a relativa apenas ao trecho da região da comporta. Os coeficientes obtidos foram comparados com coeficientes encontrados na bibliografia. Na Figura 4.4 apresenta-se graficamente a comparação para os respectivos valores nos ensaios realizados.

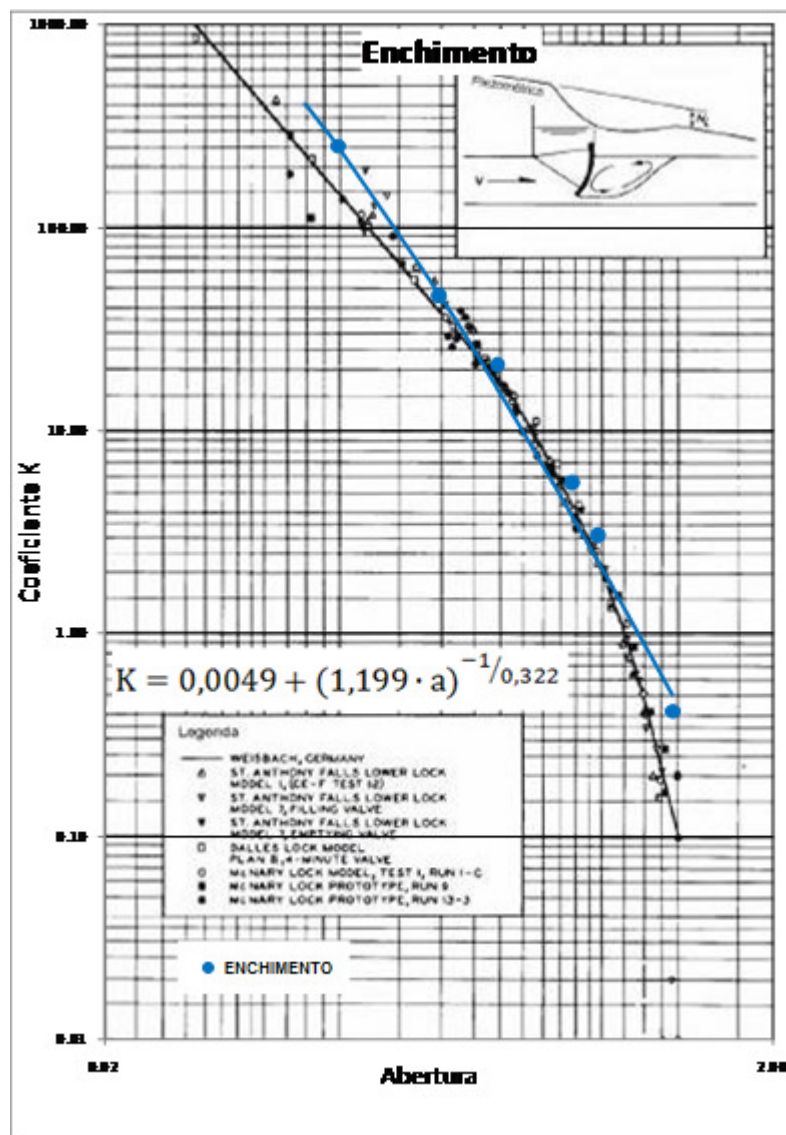


Figura 4.4 – Equação de perda de carga para a comporta no regime de enchimento comparando com dados de literatura
 Fonte: Marques *et. al.* (2010)

A equação ajustada para os pontos obtidos é dada pela seguinte equação:

$$k(a) = 0,0049 + (1,199a)^{-1/0,322} \quad (4.2)$$

na qual:

a = abertura relativa da comporta

Os coeficientes obtidos se aproximam satisfatoriamente dos coeficientes encontrados na literatura. Marques *et al.* (2010) recomenda a utilização da equação anterior para os coeficientes de perda de carga no procedimento de enchimento da eclusa do modelo físico.

- Trecho M:

O terceiro trecho analisado inicia-se na seção imediatamente a montante da comporta e termina na câmara da eclusa. Os valores para os coeficientes finais de perda de carga estão representados na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Coeficientes de perda de carga do trecho M para enchimento

Desnível H1	
Abertura	Coeficiente k
100%	1,12
60%	1,65
50%	1,99
30%	13,90
20%	67,20
10%	29,21

Desnível H2	
Abertura	Coeficiente k
100%	0,83
60%	1,36
50%	1,49
30%	6,49
20%	27,7
10%	13,2

Desnível H3	
Abertura	Coeficiente k
100%	0,59
60%	0,88
50%	0,03
30%	7,57
20%	30,51
10%	1,72

Desnível H4	
Abertura	Coeficiente k
100%	0,49
60%	0,62
50%	0,50
30%	5,23
20%	30,9
10%	15,65

Analisando os dados, tanto para o regime de esvaziamento como para o de enchimento, é possível notar uma grande variação nos valores finais obtidos. Valores discrepantes não devem ser considerados para uma análise dos coeficientes finais, por terem sofrido alguma interferência no ensaio realizado, como, por exemplo, vazamentos nos sistemas de enchimento ou problemas estruturais nos piezômetros.

Os coeficientes de perda de carga utilizados na simulação foram obtidos com base nos valores medidos nos ensaios de enchimento realizados no LAHE

Uma vez estabelecidos os parâmetros necessários para a simulação e montados os arquivos de entrada, é escolhido um ensaio realizado no modelo físico e o cenário, com a mesma condição inicial de desnível e a mesma lei de manobra realizada, é aplicado no modelo matemático. Por fim, as saídas do comportamento hidráulico resultantes do modelo matemático são comparadas com os dados medidos do modelo físico.

Os dados da Figura 4.4 mostram uma boa relação para os coeficientes na região da comporta medidos na *vena contracta*, porém tal comportamento não é encontrado para os coeficientes de perda de carga a montante e jusante da comporta, apresentados nas Tabelas 4.1 e 4.2, pois apresentam uma grande variação em seus valores.

Os dados medidos para o regime transitório foram para manobras de enchimento, portanto a análise apresentada para a obtenção dos valores finais dos coeficientes de perda de carga também é para o regime de enchimento. Porém a metodologia desenvolvida também pode ser aplicada aos dados para manobras de esvaziamento.

O valor utilizado para o coeficiente de perda de carga k_1 , relativo à perda de carga a jusante da comporta (trecho J), foi de 2,32. Esse valor foi obtido pela média dos dados que possuem um desvio padrão não discrepante.

A análise feita para os dados estão apresentados na Tabela 4.3. Os dados com aberturas relativas superiores a 30% possuem um desvio padrão do coeficiente de perda de carga, em relação à média, inferiores a 10%. Para os ensaios com abertura inferior a 30% os dados apresentam um grande desvio padrão. Para tentar aproveitar os dados de abertura inferior a 30% foi feita a análise dos dados retirando apenas o valor mais afastado do valor da média. Entretanto, os dados continuaram a apresentar desvio padrão relativo à média próximos de 30%, ainda considerado um valor muito alto, não sendo utilizados para a obtenção do valor médio final.

Tabela 4.3 – Análise dos coeficientes de perda de carga (k_1) do trecho J para enchimento

Abertura	Desnível H_1	Desnível H_2	Desnível H_3	Desnível H_4	média(k_1)	Desvio padrão (k_1)	(desvio padrão/média)*100
100%	2,11	1,98	2,05	2,04	2,05	0,05	2,60
60%	2,24	2,23	2,2	2,22	2,22	0,02	0,77
50%	2,37	2,4	2,37	2,36	2,38	0,02	0,73
30%	3,1	2,56	2,6	2,33	2,65	0,32	12,25
20%	3,74	1,86	2,92	0,68	2,30	1,33	57,66
10%	7,25	6,56	4,05	3,14	5,25	1,97	37,47

Os dados de perda de carga para o trecho de montante, representados pelo parâmetro k_2 , possuem valores com uma grande dispersão relativa ao valor médio. Conforme a análise apresentada na Tabela 4.4, o menor valor para o desvio padrão relativo à média é superior a 35%.

Tabela 4.4 – Análise dos coeficientes de perda de carga (k_2) do trecho M para enchimento

Abertura	Desnível H_1	Desnível H_2	Desnível H_3	Desnível H_4	média(k_2)	Desvio padrão (k_1)	(desvio padrão/média)*100
100%	1,12	0,83	0,59	0,49	0,76	0,28	37,0
60%	1,65	1,36	0,88	0,62	1,13	0,46	41,2
50%	1,99	1,49	0,03	0,50	1,00	0,90	89,4
30%	13,9	6,49	7,57	5,23	8,30	3,86	46,5
20%	67,2	27,7	30,5	30,9	39,1	18,8	48,1
10%	29,2	13,2	1,72	15,7	14,9	11,3	75,5

Para a obtenção do valor final de k_2 a metodologia aplicada consistiu em uma comparação empírica dos dados medidos nos ensaios transitórios e os resultados do modelo matemático para o nível da água na câmara da eclusa.

No modelo físico do LAHE foram realizados alguns ensaios de enchimento da câmara com aberturas lineares da comporta com 4 diferentes velocidades. As velocidades utilizadas nos ensaios foram de 4 rpm, 6 rpm, 7 rpm e 8 rpm, correspondendo, respectivamente, a aberturas totais em 90s, 60s, 51s e 45s. Também foi realizada uma abertura linear com velocidade de 7rpm, com uma parada no valor de abertura de 35% com uma duração de 12s e, depois de terminada a parada, seguindo a abertura com a mesma velocidade inicial. No corpo desta dissertação essa manobra será referenciada como “abertura com patamar”. Em todas as manobras realizadas as comportas são mantidas totalmente abertas ao final da manobra, não ocorrendo o fechamento da mesma.

A lei utilizada para a obtenção do valor de k_2 foi a abertura com velocidade de 4rpm, correspondendo a uma abertura total em 90 s. Adaptando algumas linhas de comando do

modelo desenvolvido, foram testados 200 diferentes valores para k_2 no intervalo de 0,01 a 2,0. Para cada valor de k_2 foi calculada a maior diferença do nível simulado com o nível medido no modelo físico, sendo o valor final escolhido o que resulta em uma menor diferença entre os dois níveis.

Para uma averiguação do valor de k_2 obtido foram simuladas outras duas diferentes leis de manobra e comparados os valores finais do comportamento hidráulico.

Na Figura 4.5 são apresentadas as leis de abertura dos ensaios utilizados para a calibração do modelo de simulação. A lei de manobra “Abertura em 90s” foi utilizada para a obtenção do valor de k_2 , sendo igual a 0,58. As leis “Abertura em 51s” e “Abertura com patamar” foram utilizadas para averiguação do valor encontrado.

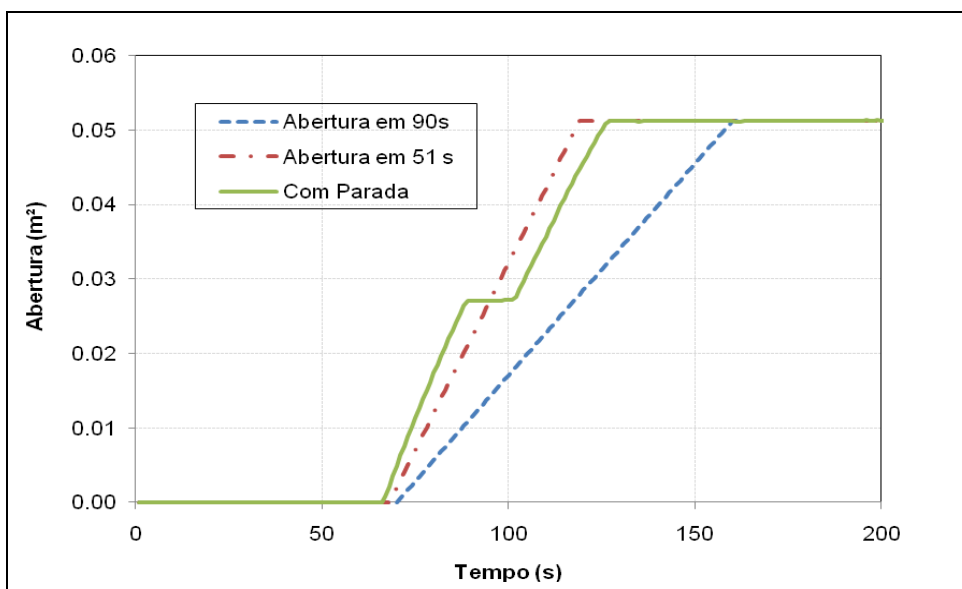


Figura 4.5 – Leis de manobras utilizadas na simulação

Na Tabela 4.5 é apresentado um resumo dos valores de perda de carga utilizados no modelo matemático de simulação para manobras de enchimento.

Tabela 4.5 – Coeficientes finais de perda de carga

Trecho	Valor
Jusante comporta montante	2,32
	$k(a) = 0,0049 + (1,199a)^{-1/0,322}$
	0,58

Os coeficientes de contração do jato na região da *vena contracta*, utilizados para o cálculo do índice de cavitação, foram calculados utilizando a seguinte equação:

$$v_c = a.C_c \quad (4.3)$$

na qual:

v_c = velocidade na região da *vena contracta*

Na Figura 4.6 é mostrada a contração do jato a jusante da comporta da eclusa.

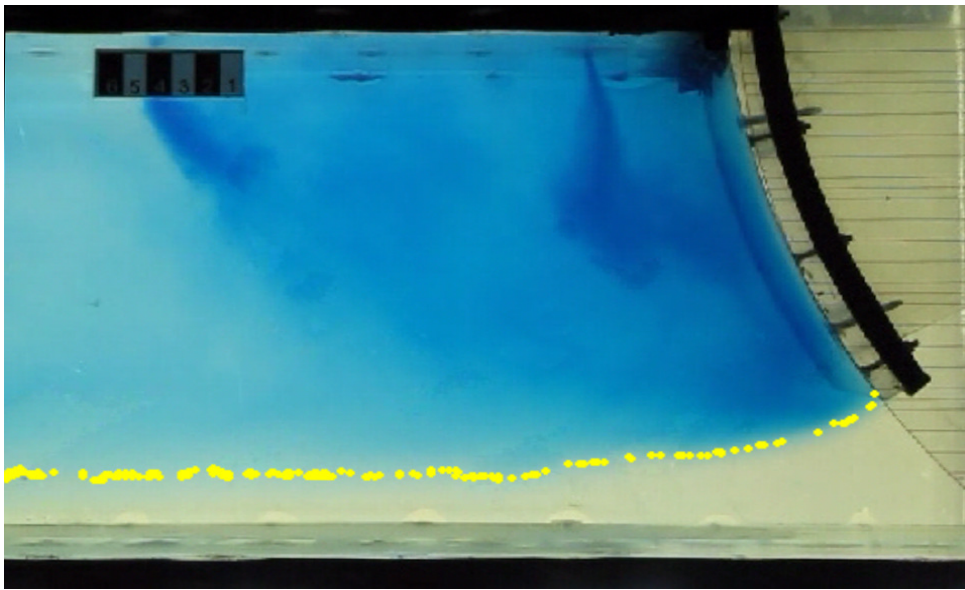


Figura 4.6 – Contracção do jato a jusante da comporta da eclusa do modelo do LAHE
Fonte: Marques *et al.* (2010)

Os coeficientes de contração calculados variaram entre 0,7 e 0,9 e foram comparados com os dados utilizados na literatura, tendo sido encontrado um bom ajuste. A equação que representa o coeficiente de contração (C_c) em função da abertura pode se escrita por:

$$C_c = 0,85 + 0,15 * \cos\left(0,05 \frac{a}{D} + 1,5\right)$$

em que:

$\frac{a}{D}$ = abertura relativa em percentagem

4.2 Algoritmo genético em eclusagem

Para simular o comportamento de enchimento da câmara da eclusa de navegação com o uso do algoritmo genético, foram utilizadas as equações 3.47 a 3.49 de posição, velocidade e aceleração do nível da água na câmara de navegação da eclusa.

O algoritmo genético foi usado para a solução de otimização da lei de comportas. Com as características de tamanho da câmara, comprimento de conduto, área das comportas e os valores de perda de carga, desejou-se determinar qual a lei de abertura que alcança o maior nível de água na câmara de navegação em menor tempo, respeitando algumas restrições impostas.

Com o intuito de analisar a lei de abertura ótima obtido pela aplicação do algoritmo genético, ela foi comparada com a lei ótima obtida por Palmier (1990) com a aplicação do método *cutting plane* para a eclusa de Promissão. Para isso foram adotadas a mesma função objetivo, as mesmas restrições e os mesmos coeficientes de perda de carga utilizados por Palmier (1990).

4.2.1 Parâmetros e variáveis do algoritmo genético

Para um bom desempenho e o correto funcionamento do algoritmo genético alguns parâmetros devem ser avaliados e definidos. Para a determinação final do valor de cada parâmetro, como número de indivíduos, probabilidade de mutação, probabilidade de cruzamento e número de sobreviventes a cada geração, foi tomada como base a aproximação do resultado final do AG com o resultado utilizando o método *cutting plane*.

4.2.2 Definição das variáveis

A variável escolhida para a aplicação do algoritmo para uma etapa de enchimento da câmara da eclusa foi a velocidade de abertura da comporta em cada intervalo de tempo. Para cada espaçamento de tempo (Δt) é necessário obter a velocidade de abertura da comporta dentro de valores pré-determinados, pois o AG utiliza variáveis com valores discretos. Notadamente, para que o modelo de simulação seja utilizado no processo de otimização, é necessário converter as informações relativas às velocidades de abertura da comporta em valores de abertura da comporta.

Para tornar o processo de obtenção da lei ótima mais ágil, é importante garantir, para todos os indivíduos, que a área de abertura máxima da comporta seja alcançada, visto que a lei ótima deve ter essa característica, mas que esse valor não seja ultrapassado, o que inviabilizaria o indivíduo.

Assim, para auxiliar a geração dos indivíduos aleatórios foram criadas duas funções no modelo para acelerar o processo de obtenção da lei ótima.

A primeira função garante que os indivíduos possuam uma abertura fisicamente possível, ou seja, que nenhuma área de abertura seja maior que o máximo valor de abertura da comporta. Dependendo dos valores de velocidade de abertura das comportas escolhidos, essa função intervém na maioria dos indivíduos. Uma vez que o valor máximo é atingido em um determinado tempo o indivíduo é alterado de forma a ter as velocidades de abertura iguais a zero a partir desse tempo. Na Figura 4.7 mostra-se um exemplo do uso da função auxiliar para um indivíduo aleatório criado que não possui significado físico após o intervalo de tempo de 700 segundos, pois apresenta um valor de abertura maior do que a abertura total. Portanto, o indivíduo adaptado será equivalente ao indivíduo aleatório até o instante 700 segundos e após esse instante terá abertura máxima.

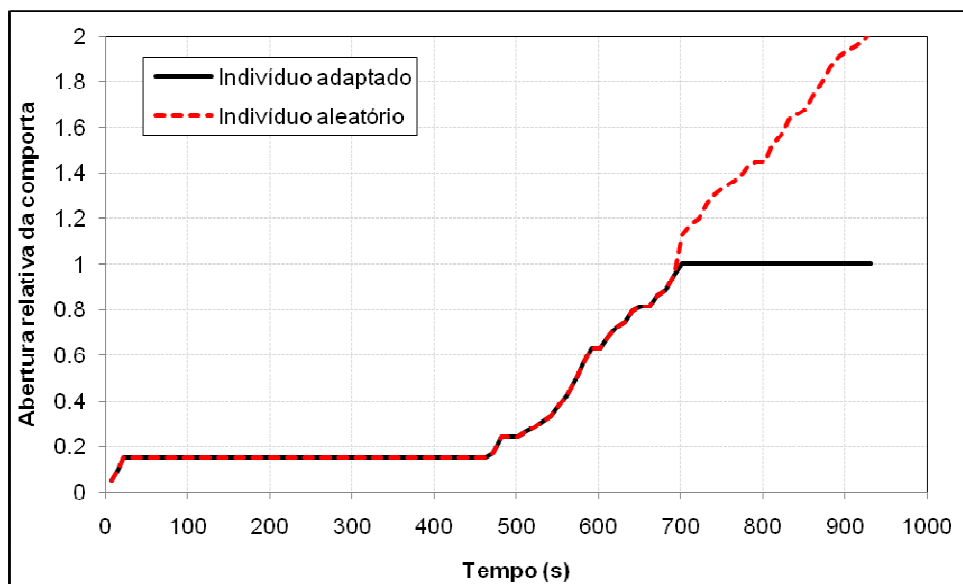


Figura 4.7 – Exemplo de intervenção para geração de indivíduos fisicamente possíveis

A segunda função foi criada tendo como base os resultados de Palmier (1990) com a aplicação do método *cutting plane*, sendo a lei de abertura ótima caracterizada por uma abertura total da comporta durante um período relativamente longo de tempo durante a

manobra. Assim, a função garante que a abertura máxima é alcançada em algum instante de tempo. A duração do intervalo de tempo de fechamento é previamente conhecida, pois é realizada com a máxima velocidade factível. Portanto, no instante de tempo limite para iniciar o fechamento a comporta o indivíduo deve estar com a máxima abertura. Todo indivíduo que não possuir abertura total nesse instante será alterado de forma que isso ocorra e para manter a lei de abertura de forma contínua, nos espaçamentos de tempo anteriores, os valores de área serão alterados para valores menores até o instante de tempo em que a abertura é inferior ao valor original.

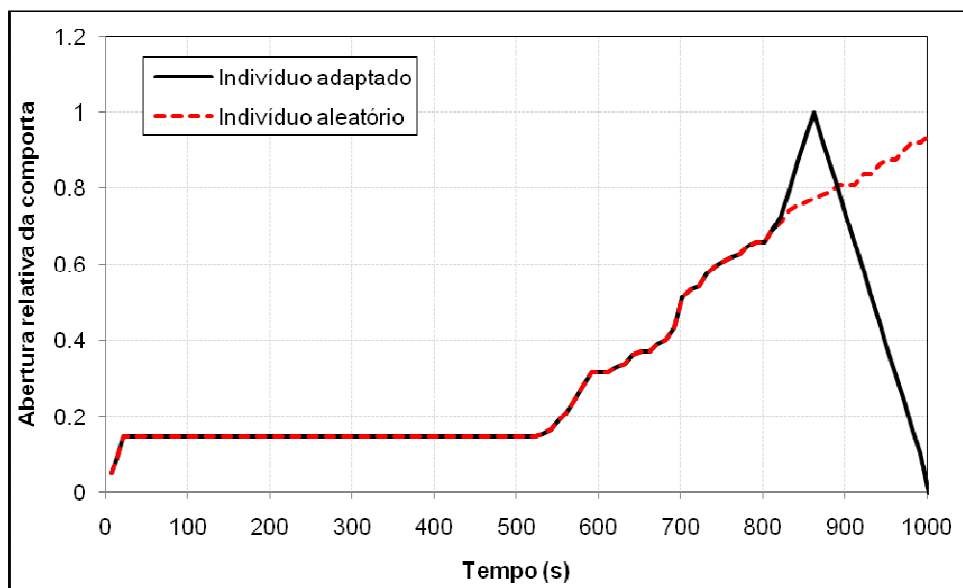


Figura 4.8 – Exemplo de intervenção para caso em que a abertura total é obrigatoriedade para os indivíduos gerados

Essa função será mais utilizada quando os valores de velocidade de abertura forem muito baixos. Porém, quando o modelo apresenta restrições muito severas, essa função é desabilitada, pois pode impossibilitar a geração de indivíduos dentro dos critérios estabelecidos nos quais o ótimo não possui abertura total durante a lei de manobra.

Com o uso do método *cutting plane*, as variáveis do problema são as áreas de abertura sob a comporta em todos os instantes de tempo. Portanto, os valores de velocidades de abertura das comportas podem assumir qualquer valor real entre zero e o limite máximo de abertura. A velocidade máxima de abertura da comporta deve ser determinada em função da restrição de seu servo mecanismo, normalmente estabelecida pelo seu fabricante. Para a eclusa de Promissão o tempo mínimo (velocidade máxima) para a abertura (e fechamento) total é de 140 segundos.

Para a aplicação do AG foram escolhidas 4 velocidades possíveis de abertura das comportas, sendo três delas relacionadas aos seguintes tempos referentes à abertura total: 140s, 210s e 420s. A quarta velocidade é igual a zero, ou seja, é mantida a abertura do intervalo de tempo anterior. Portanto, foi necessária a utilização de 2 binários por intervalo de tempo.

O tempo total de manobra para a primeira iteração é fixo e igual a 1001,75 segundos. Cabe aqui lembrar que caso o tempo total específico não seja suficiente para chegar ao nível de montante deve-se alterá-lo de tal forma que o nível final na câmara da eclusa seja igual ao de montante. Entretanto, com o objetivo de comparar a resposta do ótimo alcançado pelo AG com o método *cutting plane* é suficiente apenas a utilização do mesmo tempo total.

Na aplicação por Palmier (1990), o tempo total inicial de eclusagem de 1001,75 segundos foi espaçado por dois valores: de 7,25 segundos nos 3 primeiros intervalos de operação e 10 segundos no restante do tempo.

Portanto, do tempo zero de simulação até o tempo T final de manobra serão 102 instantes de tempo. Entretanto, como as condições de contorno do problema são pré-estabelecidas no instante de tempo inicial e final da manobra o número de intervalos em que serão calculadas, as velocidades de abertura passam a ser relacionadas a 100 instantes de tempo.

Para determinar o comprimento de cada indivíduo aplica-se a equação 3.76, resultando em um valor de 200 dígitos necessários para identificação de cada indivíduo, pois 4 diferentes números decimais são representados por dois dígitos binários.

Outros importantes parâmetros iniciais necessários são:

- número de indivíduos na população;

O número de indivíduos necessários para um bom desempenho está vinculado ao número de variáveis do problema e ao comprimento do indivíduo. Para um resultado satisfatório foi utilizado um total de 999 indivíduos. O grande número de indivíduos não acarreta em um comprometimento computacional, pois, apesar de muitas, são interações matemáticas simples.

- probabilidade de cruzamento;

A probabilidade de cruzamento é de 50%, ou seja, em metade da população de uma geração ocorre a troca dos valores binários. Isso não significa que metade da população foi alterada,

pois é possível que ocorram trocas entre valores binários de igual número, não resultando em mudança no indivíduo.

- probabilidade de mutação;

A probabilidade de ocorrência de mutação para cada indivíduo é 50% e o local de mutação é determinado aleatoriamente.

- taxa de sobrevivência da geração;

A taxa de sobrevivência da geração é de 20% do total. Apenas os 200 melhores indivíduos serão utilizados como progenitores para a geração futura, sendo que o número de indivíduos filhos proveniente do indivíduo pai (progenitor) é determinado proporcionalmente ao valor de sua função objetivo. Ou seja, os melhores progenitores serão responsáveis por um número maior de novos indivíduos.

- diferença máxima da função objetivo;

O valor máximo da diferença da função objetivo, para continuação das interações é de 0,0002 metros. A cada final de interação o valor máximo da função objetivo é comparado com o valor máximo da interação anterior. O modelo interpreta que o ótimo foi alcançado quando essa diferença é menor do que 0,001.

5 RESULTADOS

5.1 Comparação entre os métodos de simulação

Conforme a metodologia descrita no item 4.1.2, seguem abaixo os resultados para a lei de manobra aplicada com o objetivo de comparar o desempenho dos métodos numéricos de Runge-Kutta de quarta ordem e a transformada de Laplace.

Graficamente, para a velocidade e o nível da água, a diferença dos resultados entre os modelos não é perceptível. Para a evolução do nível da água na câmara da eclusa (Figura 5.1), a diferença máxima foi de 2 centímetros, representando menos de 0,07% do desnível inicial de 30 metros. Para a velocidade de subida do nível da água (Figura 5.2), a máxima diferença foi menor do que 0,002 m/s, representando 3,3 % do valor máximo de velocidade, que é igual a 0,05 m/s. Para a aceleração ocorre uma maior diferença nos primeiros instantes de tempo (Figura 5.3), mas a média das diferenças não é maior do que 0,7 %. Portanto os métodos apresentam valores muito próximos.

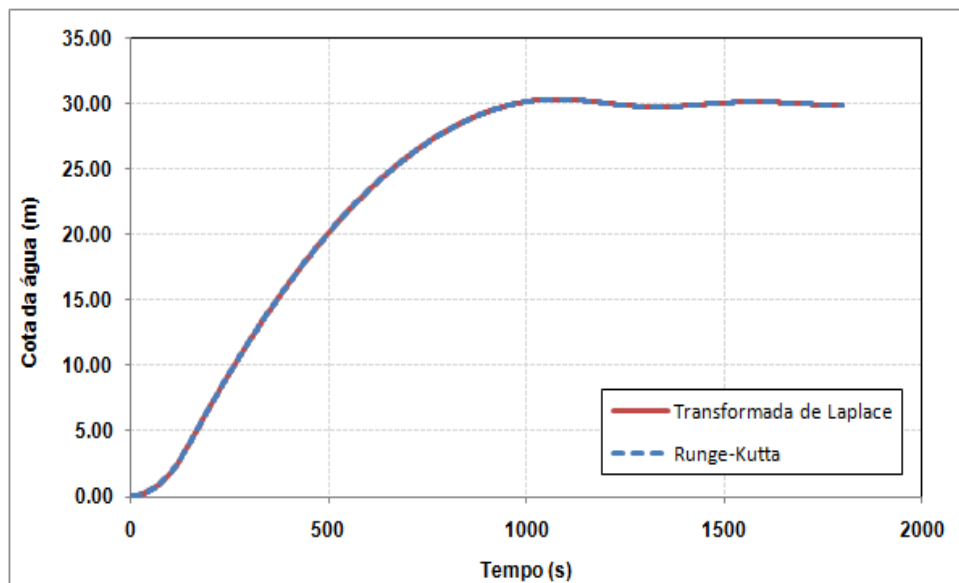


Figura 5.1 – Evolução do nível da água para a transformada de Laplace e Runge-Kutta

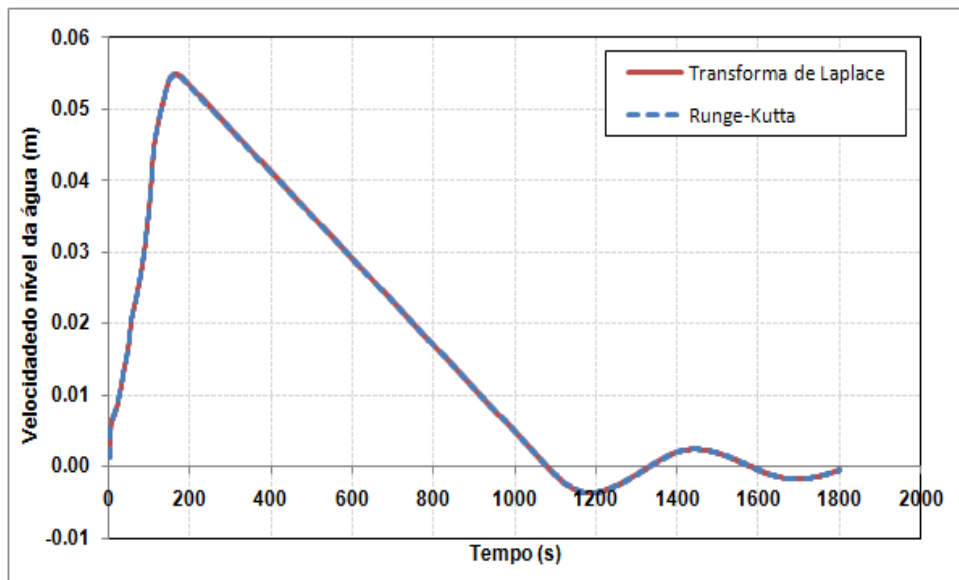


Figura 5.2 – Velocidade de subida do nível da água para transformada de Laplace e Runge-Kutta

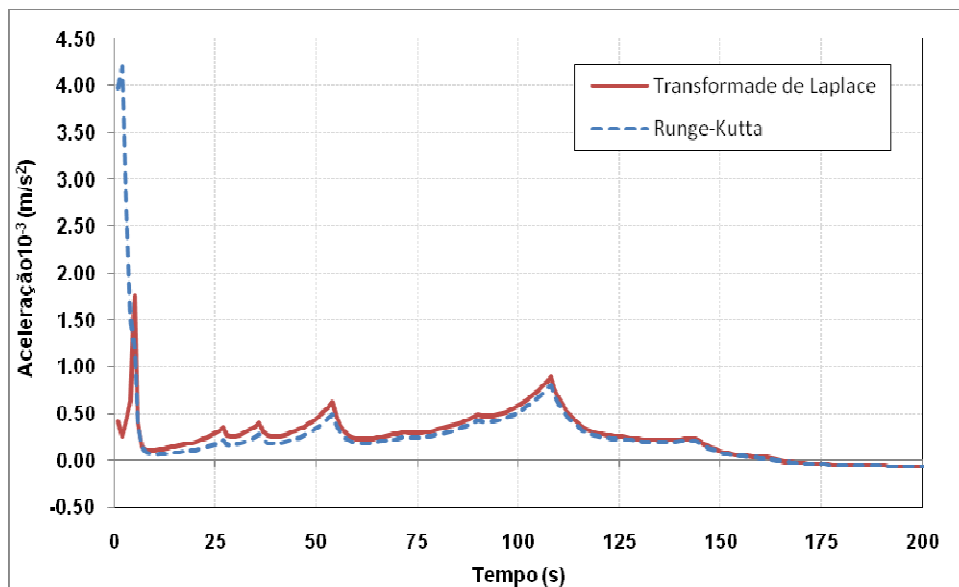


Figura 5.3 – Aceleração de subida do nível da água para transformada de Laplace e Runge-Kutta

Com o intuito de saber qual dos dois métodos era o mais preciso, Palmier (1990) testou os métodos para funções $\Phi(t)$ que possibilitassem calcular de forma exata as integrais das equações 3.47 a 3.49. Em todos os casos, verificou-se uma maior precisão para a aplicação da transformada de Laplace. Por isso, na sequência deste trabalho optou-se pela utilização desse método.

5.2 Calibração do modelo de simulação para a Eclusa do LAHE

Dada a metodologia descrita no item 4.1.2, foram selecionadas leis de aberturas realizadas no modelo físico e comparados os resultados dessas mesmas leis com o uso do modelo matemático de simulação desenvolvido que aplica as equações resultantes da transformada de Laplace para a posição, velocidade e aceleração do nível da água na câmara da eclusa.

O sistema de alimentação possui duas comportas com $0,0256\text{m}^2$ de área cada ($0,16\text{m}$ de largura e $0,16\text{m}$ de comprimento). Entretanto, o modelo de simulação desenvolvido considera apenas uma comporta no sistema do servo mecanismo. Portanto, considerou-se que a comporta possui $0,0512\text{ m}^2$ de área total. Os outros valores utilizados para representar as dimensões do modelo físico são os mesmos apresentados na Tabela 3.2.

O ensaio em regime transitório utilizado para a obtenção do valor de k_2 , referente ao valor de perda de carga a montante da comporta, consiste em uma abertura linear do sistema de enchimento em 90s. A lei de abertura relativa está representada na Figura 5.4.

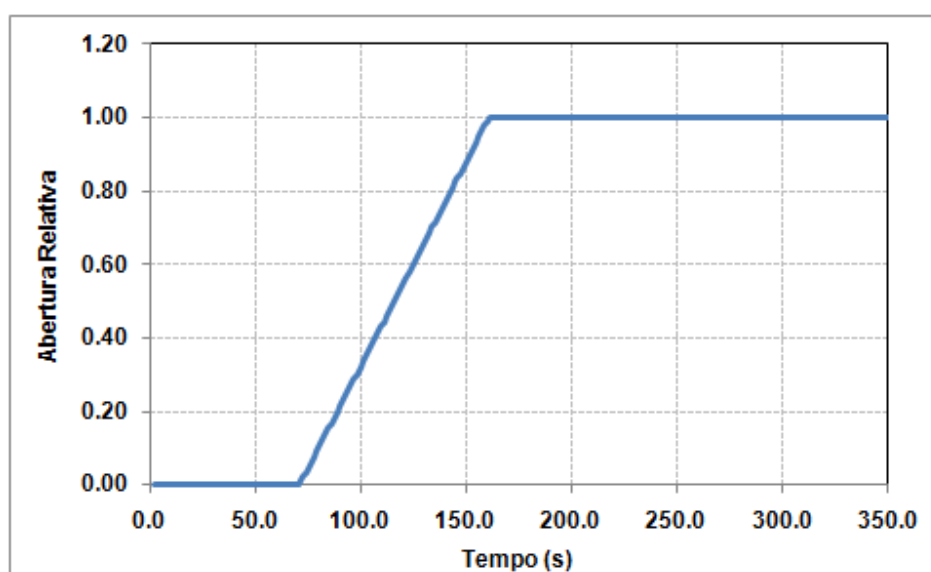


Figura 5.4 – Lei de abertura relativa utilizada para calibração do modelo de simulação

As principais características da lei são: (i) o início da abertura ocorre após 70s, sendo esse o intervalo necessário para o enchimento e estabilização da cuba de montante; (ii) a abertura total é realizada em 90 segundos; e (iii) mantém-se a comporta totalmente aberta até o final da manobra.

As condições iniciais do cenário de enchimento para a lei de manobra aplicada estão apresentadas na tabela 5.1.

Tabela 5.1 – Condições iniciais da manobra

Parâmetro	Dimensão (m)
nível de coroamento	41,67
nível de montante	40,93
nível de jusante	40,31
piso do aqueduto	40,13

O desnível total entre as cotas dos níveis de montante e jusante é equivalente a 0,62 metros. O modelo físico está na escala de 1:25, portanto, em escala real o desnível seria equivalente a 15,50 m no protótipo. Porém, o foco principal do trabalho é com base nos dados medidos em modelo físico, não dando uma maior ênfase para as transformações das variáveis medidas para escala real.

A evolução da cota do nível da água foi utilizada como entrada no modelo de calibração para determinar o melhor valor do coeficiente k_2 . Os coeficientes utilizados para k_1 e $k_v(t)$, referentes, respectivamente, aos parâmetros de perda de carga de jusante e na região da comporta, são os apresentados na Tabela 4.5.

Nas Figuras 5.5 e 5.6 são mostradas, respectivamente, as cotas de nível d'água e as velocidades de subida do nível d'água obtidas com os modelos físico e matemático. Neste último, o valor do coeficiente de perda de carga de montante é igual a 0,58.

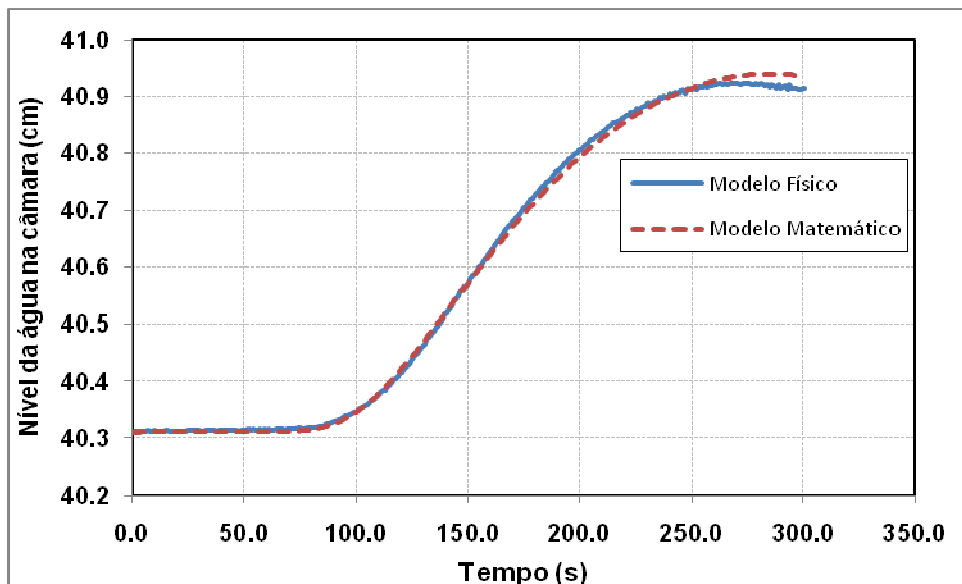


Figura 5.5 – Comparação das cotas do nível d'água na câmara da eclusa

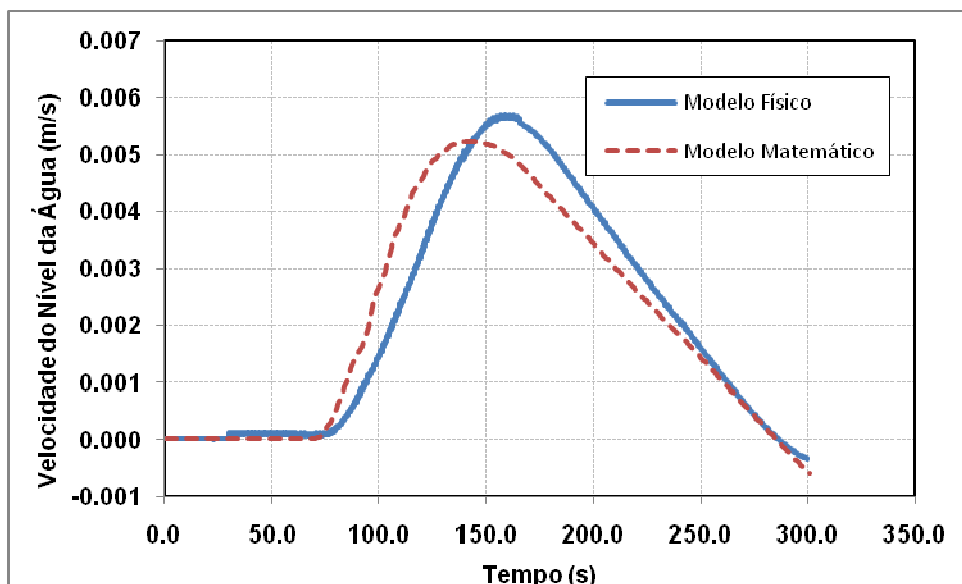


Figura 5.6 – Comparação da velocidade de subida do nível d'água na câmara da eclusa

A evolução da cota do nível d'água no modelo matemático reflete o comportamento do modelo físico. O tempo total de subida, após os 70 s iniciais para estabilização do nível da cuba de montante, foi de 230 s, tanto para os dados medidos no modelo físico como para os resultados da simulação no modelo matemático. A comparação entre os resultados dos modelos físicos e matemático para a evolução da cota do nível d'água mostra que, para os coeficientes de perda de carga utilizados, foi eficiente a etapa de calibração do modelo matemático.

A pequena diferença observada nas cotas do nível final da manobra certamente foi influenciada pela oscilação do nível da água de montante da cuba. Na Figura 5.8 ilustra-se

essa variação, sendo observado um desnível médio de aproximadamente 2,0 centímetros. A oscilação ao final da manobra devido à inércia do sistema é ilustrada na Figura 5.9.

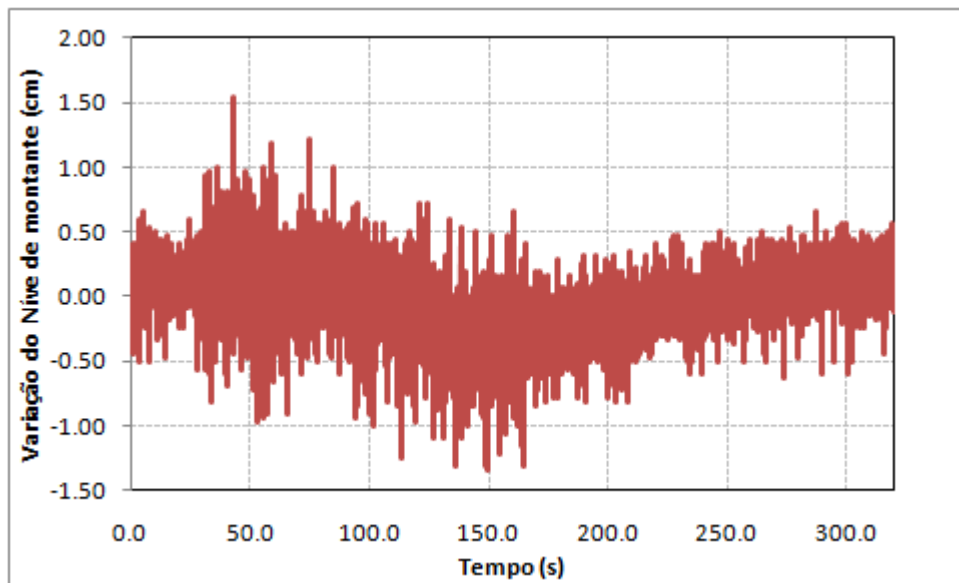


Figura 5.7 – Oscilação do nível de montante

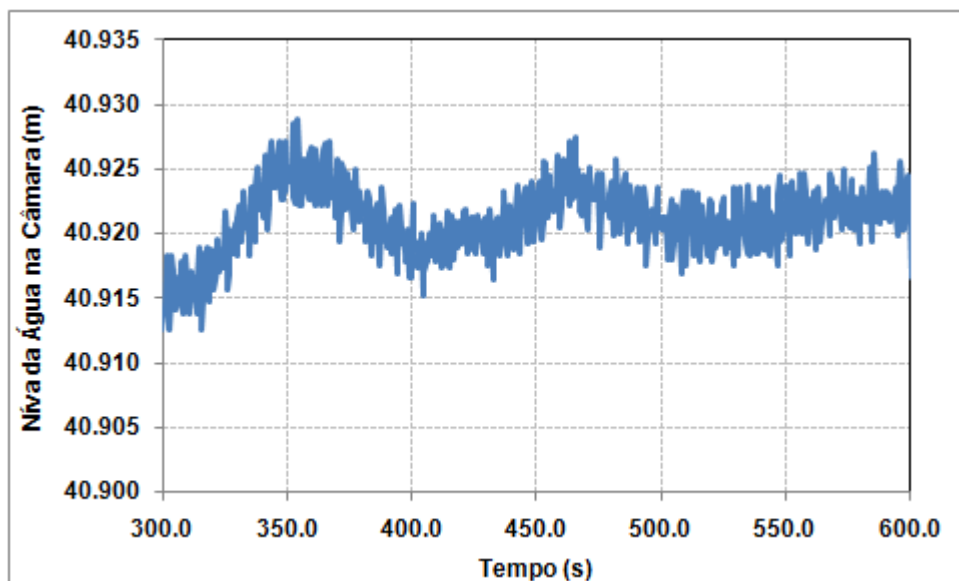


Figura 5.8 – Inércia do nível da água ao final da manobra

A comparação da velocidade do nível d'água na câmara da eclusa mostra que o perfil de velocidades possui praticamente a mesma forma em ambos os casos. As velocidades máximas alcançadas no modelo físico e no modelo matemático foram, respectivamente de: $5,7 \cdot 10^{-3}$ m/s, no intervalo de tempo de 155 s, e de $5,2 \cdot 10^{-3}$ m/s, no intervalo de 142s. Ou seja, os resultados podem ser considerados satisfatórios.

Para a consolidação dos coeficientes de perda de carga utilizados foram consideradas outras duas leis de manobras: “Abertura em 51s” e “Abertura com patamar”, conforme representado na Figura 4.5. Para ambas as leis de manobra a cota do nível de jusante foi de 40,31 m e o de montante de 40,93 m, ou seja, um desnível total de 0,62 metros.

Nas Figuras 5.9 a 5.12 são ilustradas comparações entre os resultados dos modelos físico e matemático para as cotas de nível d’água e de sua velocidade de subida dentro da câmara da eclusa para as duas manobras de abertura. As Figuras 5.9 e 5.10 são referentes à situação de “Abertura em 51s” e as Figuras 5.11 e 5.12 à situação de “Abertura com patamar”.

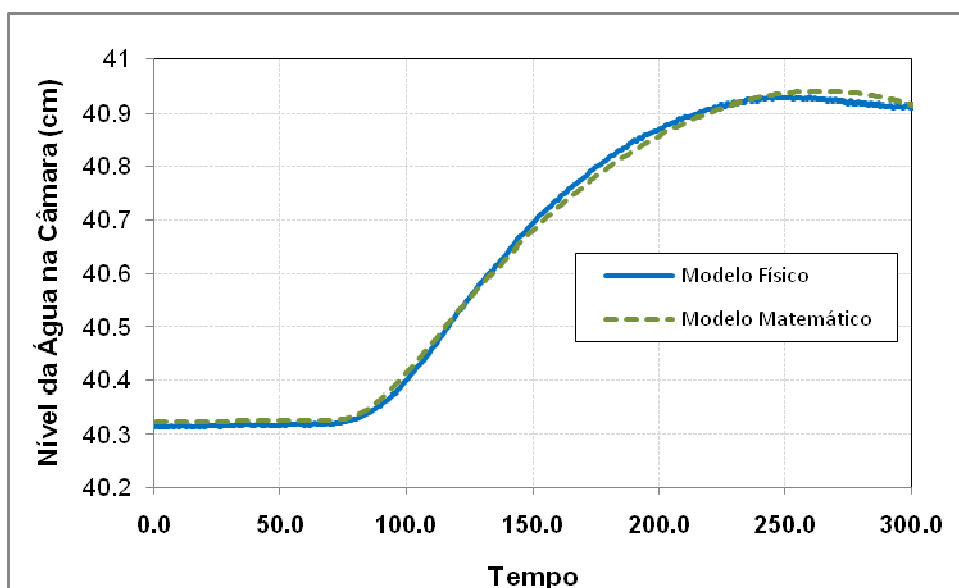


Figura 5.9 – Comparação do nível d’água na câmara da eclusa

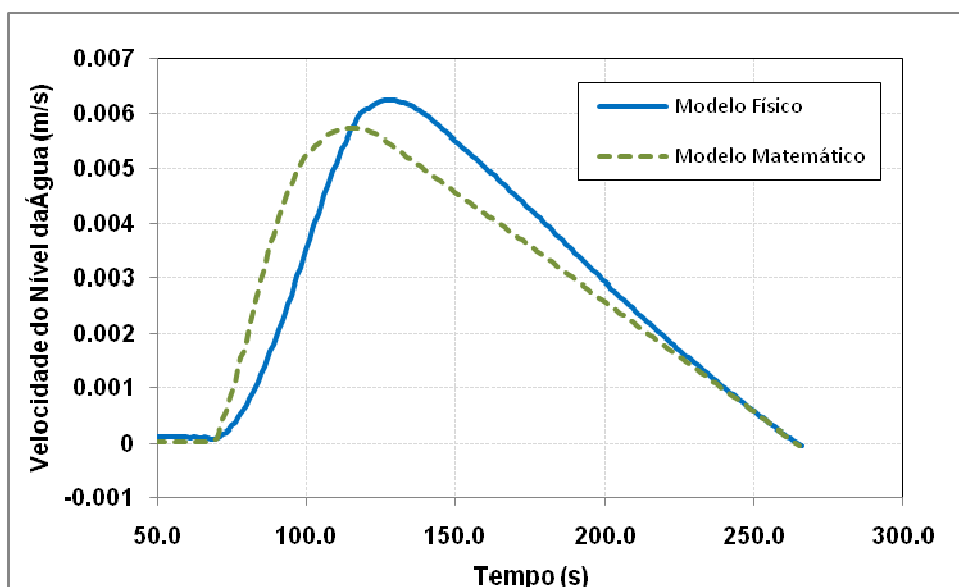


Figura 5.10 – Comparação da velocidade de subida da água na câmara da eclusa

Para a abertura linear em 51 s, a cota do o nível da água atinge o valor de montante em de 260 s para o modelo matemático e para o modelo físico, um intervalo de tempo menor do que a primeira lei de manobra aplicada. Esse resultado era esperado, pois a velocidade de abertura foi maior. Por esse motivo, a velocidade máxima atingida pelo nível da água para a segunda lei também é superior, mostrando uma relação direta de proporcionalidade entre a velocidade de abertura e a velocidade de subida do nível da água.

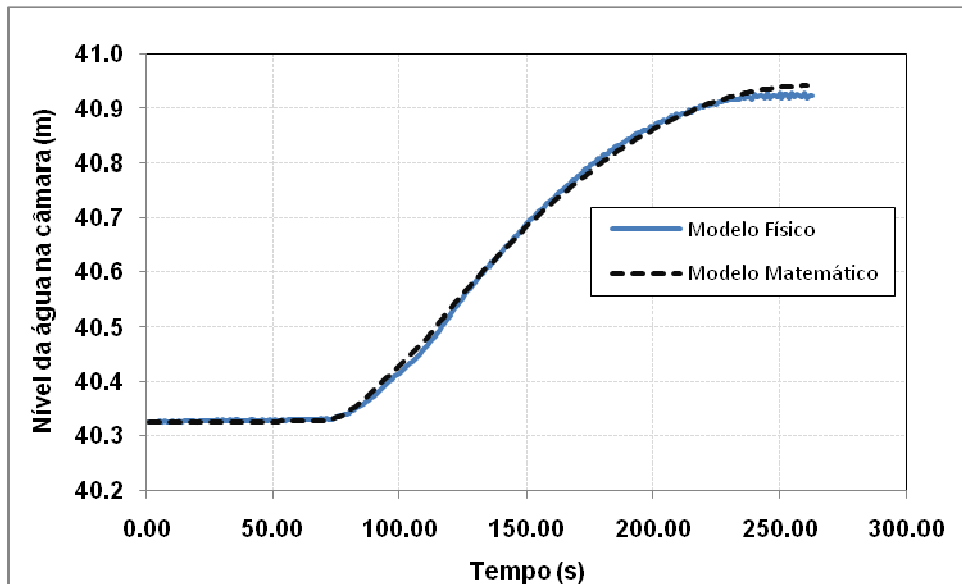


Figura 5.11 – Comparação do nível da água na câmara da eclusa simulado e medido

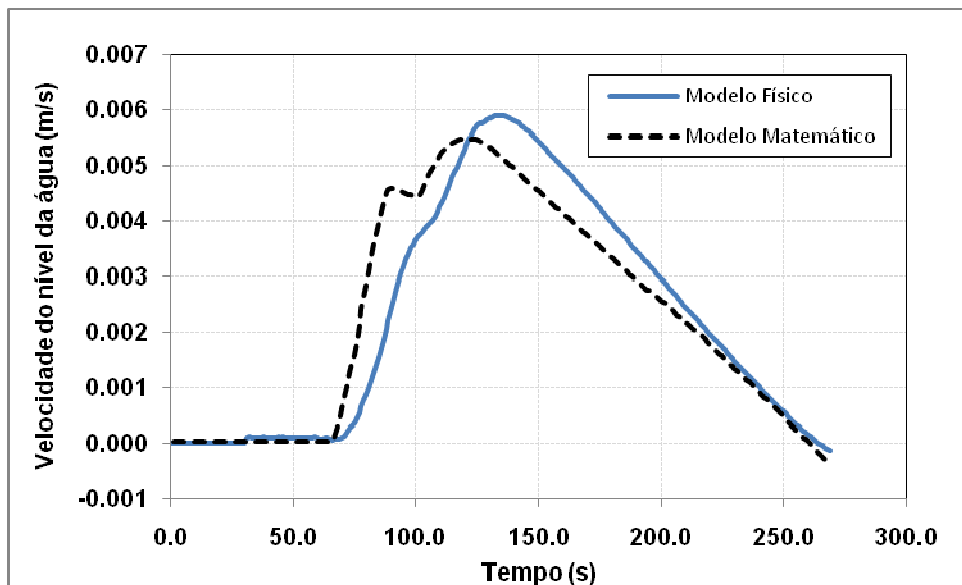


Figura 5.12 – Comparação da velocidade de subida do nível da água na câmara da eclusa

Para a abertura com patamar o comportamento hidráulico para o nível de água na câmara da eclusa também é obtido com relativo êxito, pois, embora os perfis de velocidade sejam similares, observa-se uma defasagem nos tramos de subida.

Portanto, com o uso dos coeficientes da tabela 4.3 fica consolidada a calibração do modelo de simulação e a sua utilização para diferentes leis de manobras.

5.3 Comparação entre o método *cutting plane* e o algoritmo genético

Neste item do capítulo são mostrados os resultados do desempenho do AG para a aplicação com dados da eclusa de Promissão. O método *cutting plane*, como detalhado no item 3.4.1 do Capítulo de Metodologia, foi aplicado por Palmier (1990) e foi tomado como base de comparação para uma avaliação do desempenho do algoritmo genético.

A eclusa de Promissão localiza-se no rio Tietê, no estado de São Paulo. Ela opera sob um desnível máximo de 28,4 metros. A hidrelétrica de Promissão começou a ser operada em 1977 e a eclusa foi concluída para navegação em 1986, com largura útil de 12,00 m, comprimento de 142,00 m e calado de 3,50m. Sua capacidade de carga gira em torno de 14.800.000 toneladas por ano e para operação com desnível máximo ela possui problemas relacionados à cavitação.

As comportas de controle de vazão são planas com largura de 1,5 m e 3 m de altura, totalizando 4,5 m². A velocidade máxima de operação permite uma abertura total em 140 segundos. Cada sistema, de enchimento e esgotamento, possui duas comportas de mesmas áreas. Entretanto, como o modelo desenvolvido considera o sistema de alimentação com apenas uma comporta, adaptou-se a abertura total para apenas uma comporta de 9 m² de área.

Nas Figuras 5.13 e 5.14 são apresentados, em escala de 1:400, os sistemas de enchimento/esgotamento que são realizados pelo fundo da câmara da eclusa de Promissão.

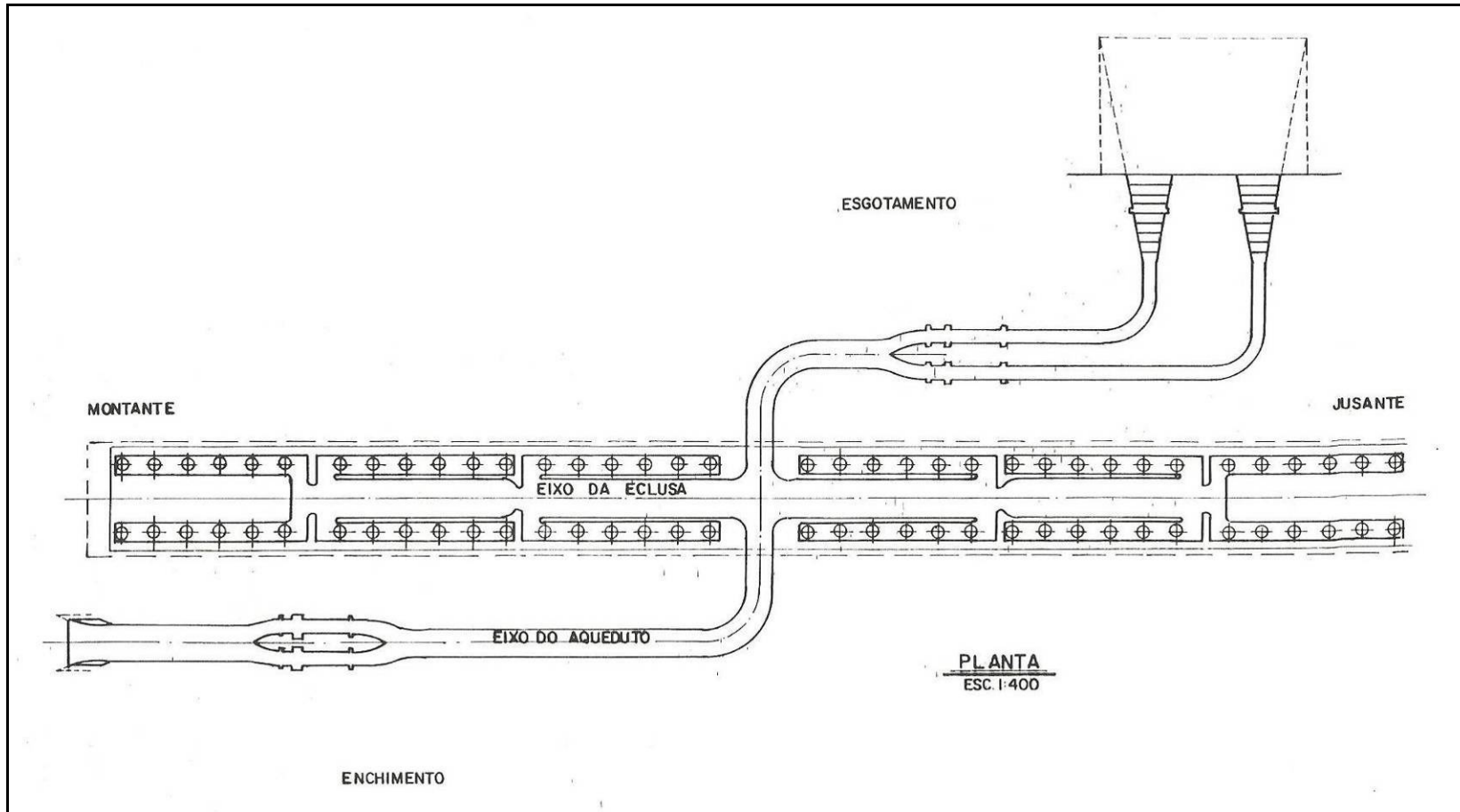


Figura 5.13 – Sistema de enchimento e esgotamento da eclusa de Promissão em planta
 Fonte: Palmier (1990)

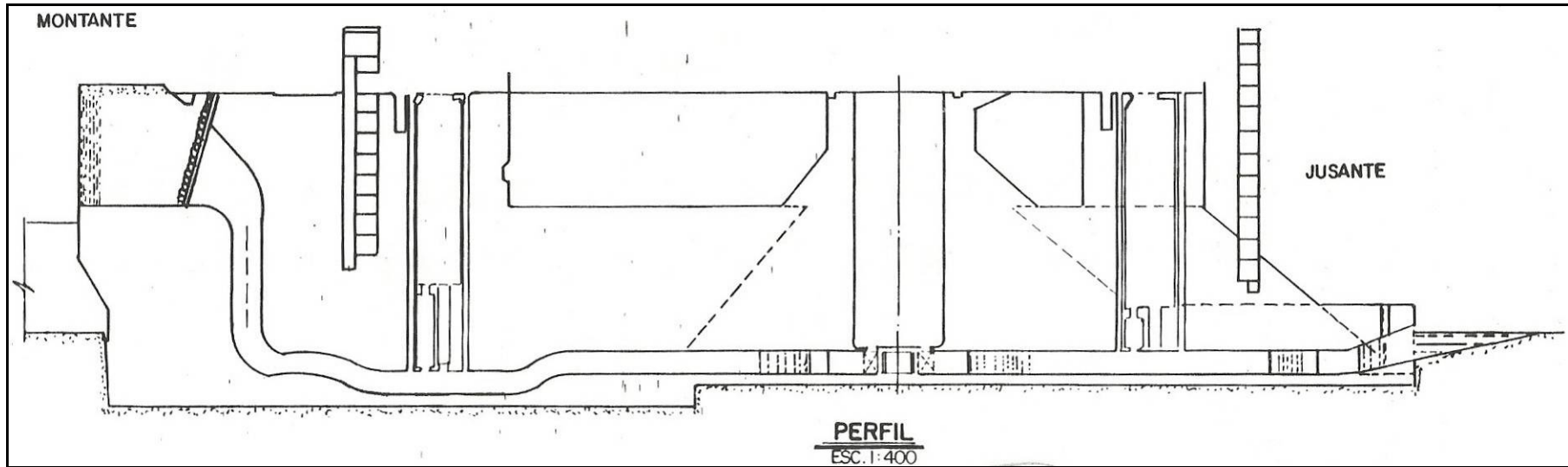


Figura 5.14 – Sistema de enchimento e esgotamento da eclusa de Promissão
Fonte: Palmier (1990)

O servo mecanismo da comporta de Promissão possui velocidade máxima de abertura ou fechamento igual a aproximadamente 0,064 m²/s (ou abertura total em 140s). O algoritmo genético utiliza valores discretos para as variáveis de velocidade de abertura. Portanto, foram adicionados mais três valores possíveis de abertura, a saber, abertura total em 210s e 420s e uma última com velocidade nula. As duas primeiras são iguais a um terço e dois terços da velocidade máxima de abertura e a velocidade nula mantém o valor de abertura igual à abertura do tempo anterior.

Portanto, os valores discretos das variáveis de velocidades de abertura dos indivíduos do AG são:

- 0,064 m²/s;
- 0,043 m²/s;
- 0,021 m²/s; e
- 0,0 m²/s.

As restrições utilizadas no algoritmo genético foram as mesmas utilizadas por Palmier (1990), a saber:

- atendimento, em qualquer intervalo de tempo da manobra, da equação geral do escoamento (3.4 – 5.1).

$$z'' + (\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_v(t))\omega^2 A_c^2 z' |z'| + \omega^2 z - \omega^2 z_{res} = 0 \quad (5.1)$$

- segurança contra a cavitação:

$$\sigma(t) > \sigma_{crítico} \quad (5.2)$$

na qual:

$$\sigma(t) = \frac{p_v + (p_{atm} - p_w)}{\gamma \frac{v_v^2(t)}{2g}}$$

sendo:

$\sigma_{crítico}$ = valor crítico do índice de cavitação

- limite das velocidades máximas de abertura e fechamento das comportas:

$$-v_{\max} < \frac{dA}{dt} < v_{\max} \quad (5.3)$$

- limite das velocidades máximas na câmara da eclusa:

$$|z'| \leq |z'_{\max}|_v \quad (5.4)$$

As variáveis do problema de otimização foram determinadas como o valor da velocidade de abertura da comporta em cada instante de tempo t . Quanto maior o tempo de duração em que a comporta está em operação, maior será o número de variáveis do problema.

Devido a características próprias da eclusa, no início da manobra de enchimento o critério de cavitação dificilmente é cumprido. Palmier (1990) considerou o início das operações para otimização com a mesma sequência de aberturas (abertura até 15% do total durante os 461,75 segundos iniciais), de tal forma que as leis de manobra a serem obtidas não atendem o critério de cavitação durante os mesmos intervalos iniciais do tempo de operação.

As condições iniciais e finais dos problemas de enchimento foram:

- cota do nível d'água inicial na câmara igual à cota de jusante e velocidade inicial de subida igual a zero; e
- velocidade de subida do nível d'água no instante final da manobra igual a 0,0 m/s.

Para a segunda condição ser obedecida, optou-se por terminar a lei de manobra com as comportas fechadas.

Portanto, para aplicação do algoritmo genético a faixa de tempo a ser otimizada é iniciada após os 461,75 segundos iniciais (equivalente a 47 intervalos) e até os 140 segundos finais (equivalente a 14 intervalos de tempo), começando quando o critério de cavitação é obedecido e terminando com um fechamento com a máxima velocidade.

O limite para velocidade máxima de subida do nível d'água é específico para cada eclusa e embarcação. Para efeito de aplicação, o limite máximo considerado foi o valor de 0,058 m/s, valor esse igual ao utilizado por Palmier (1990).

Seguem na Figura 5.15 algumas das primeiras leis de manobras geradas pelo algoritmo genético de acordo com o item 4.2. Na figura fica evidente que os 461,75 segundos iniciais de abertura e os 140 segundos finais de fechamento são iguais para todos os indivíduos. Na Figura 5.16 é representada a progressão do nível máximo atingido durante as interações (gerações) do algoritmo genético, sendo o valor referente ao melhor indivíduo da interação em questão.

O algoritmo termina as interações quando o valor máximo obtido anteriormente se aproxima do valor máximo da interação atual. Esse valor é previamente estabelecido e o valor adotado foi de 0,0002 metros (valor esse alcançado entre a 26^a e 27^a interação).

É interessante notar que o máximo nível alcançado em algumas interações é menor do que o equivalente da interação anterior, embora os valores sejam relativamente muito próximos. Isso ocorre devido à possibilidade do melhor indivíduo também sofrer alguma mudança por meio de cruzamento e/ou mutação. Observa-se, todavia, uma rápida recuperação do processo, visto que cotas de nível d'água ainda maiores são obtidas em interações posteriores.

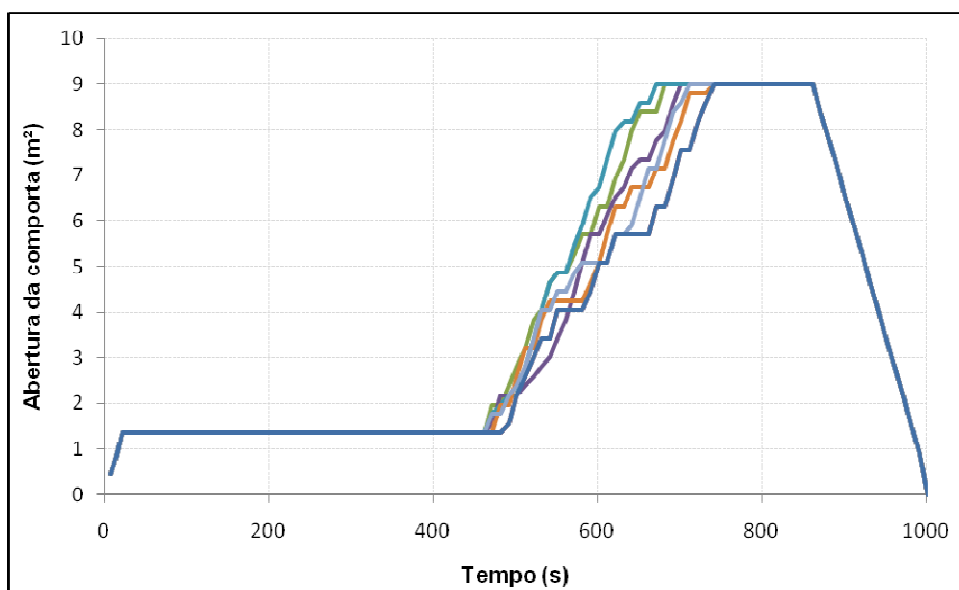


Figura 5.15 – Aberturas iniciais geradas pelo algoritmo genético

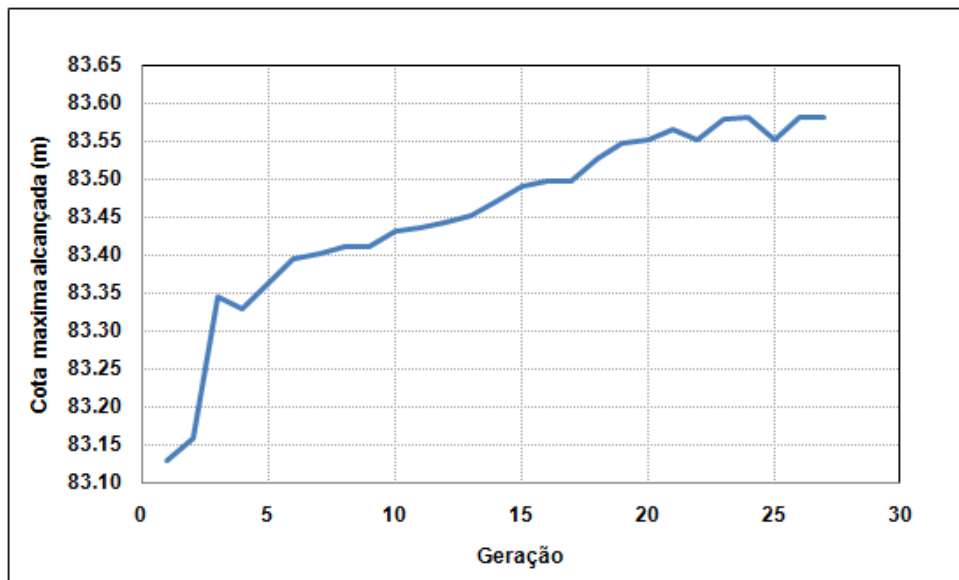


Figura 5.16 – Evolução da cota máxima alcançada por interação

Nas Figuras 5.17 a 5.19 são apresentados alguns resultados obtidos para a etapa de enchimento. A Figura 5.17 ilustra a evolução da cota do nível d'água na câmara da eclusa para a lei de abertura otimizada. Para o tempo total fixo em 1001,75s a cota do nível final de 83,32 m ainda é um pouco inferior à cota do nível de montante de 84,0 m. Portanto, seria necessário que o tempo fosse um pouco maior. Entretanto, a lei de abertura seria igual à lei obtida, diferenciada apenas em uma maior duração em que a comporta é mantida totalmente aberta antes de iniciar a operação de fechamento.

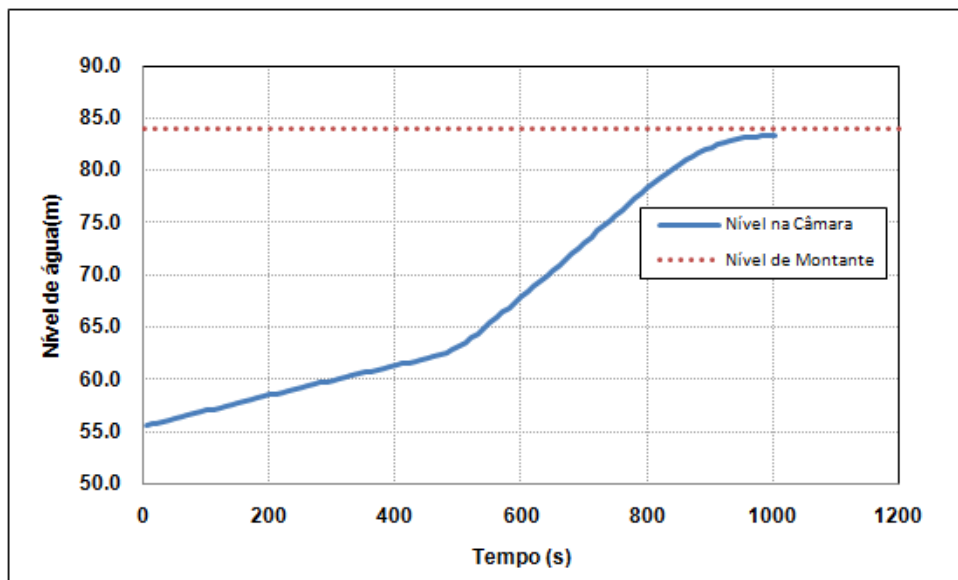


Figura 5.17 – Evolução da cota do nível d'água para a lei ótima para $T = 1001,75s$

Na Figura 5.18 ilustra-se o comportamento da velocidade de subida do nível da água na câmara. Nos primeiros instantes de tempo até o tempo de 461,75 o perfil de velocidade é praticamente constante. Isso ocorre pois a abertura da comporta permanece constante no patamar de 35% de abertura. O pequeno decréscimo no valor da velocidade ocorre devido à diminuição da diferença entre as cotas dos níveis d'água de montante e na câmara da eclusa.

A partir do instante de tempo superior a 461,75, o algoritmo indica que as comportas devem ser abertas com velocidade máxima. As restrições que limitam a manutenção da velocidade máxima de abertura são as de velocidade do nível d'água na câmara e o índice de cavitação. Conforme a Figura 5.19, o índice de cavitação é a restrição limitante em primeira instância até o instante de tempo próximo a 550 segundos, a partir do qual a cavitação crítica já não é mais alcançada pois o valor de $\sigma(t) > \sigma_{critico}$. Todavia, a velocidade máxima de subida do nível d'água atinge um valor próximo ao máximo, ocasionando uma abertura mais lenta.

Próximo ao intervalo de tempo de 800 segundos as restrições de velocidade e de cavitação já não são mais limitantes. Conforme indica a Figura 5.21, a comporta já se encontra totalmente aberta e próxima do início de fechamento.

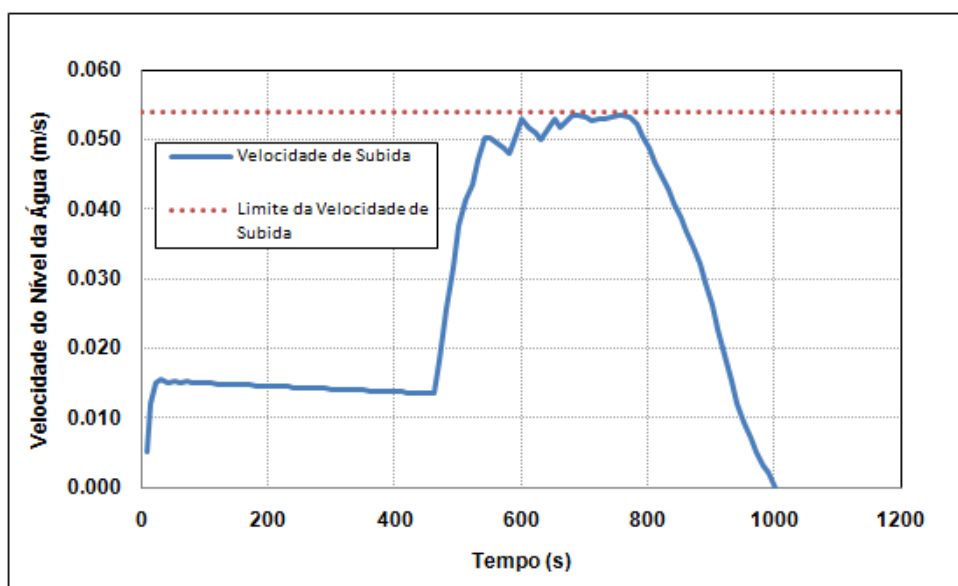


Figura 5.18 – Velocidade de subida do nível da água para a abertura otimizada

Outro importante ponto a ser destacado nos resultados é o valor nulo de velocidade ao final da lei de manobra, fato esse condicionado ao fechamento das comportas ao término da eclusagem.

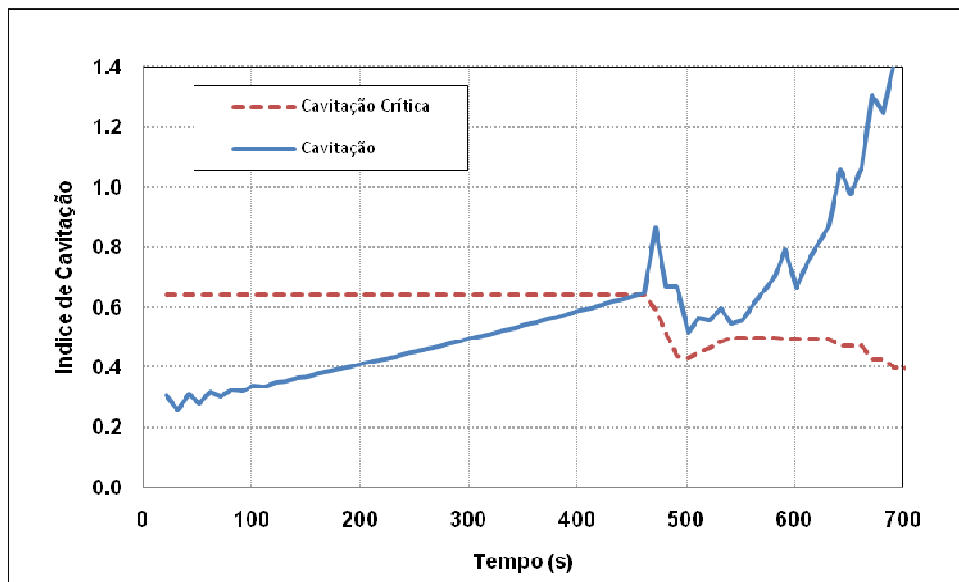


Figura 5.19 – Índice de cavitação da manobra otimizada e de cavitação crítica

Na Figura 5.20 ilustra-se o comportamento da aceleração do nível d'água, cujas principais características são: (i) um alto valor no início da lei de manobra, ocasionado pelo baixo nível de água na câmara da eclusa; (ii) uma aceleração praticamente nula no intervalo de tempo em que a comporta permanece com abertura no patamar dos 35%; e (iii) uma maior oscilação durante os instantes de tempo em que as restrições limitam a lei de abertura.

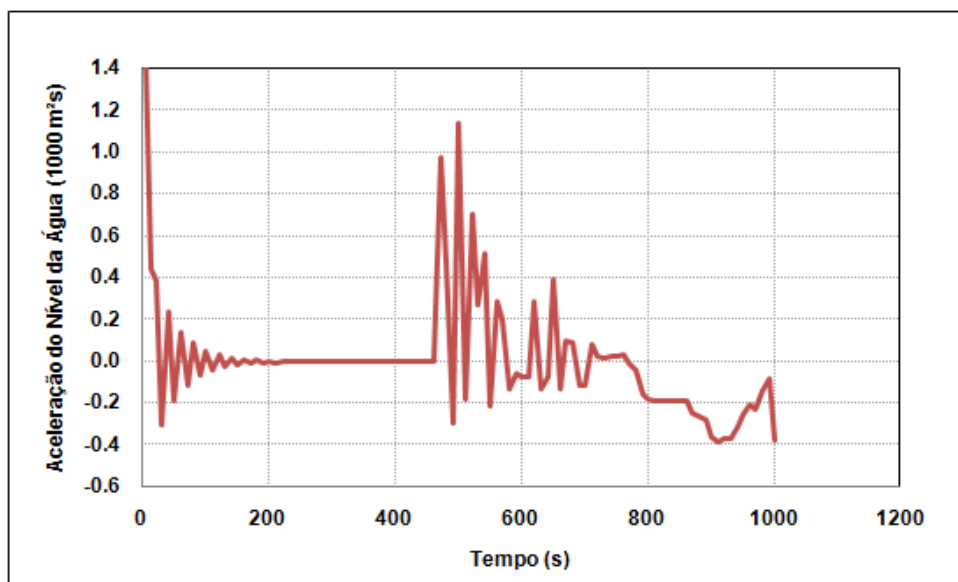


Figura 5.20 – Aceleração da água para abertura otimizada

Na Figura 5.21 são representadas as leis ótimas de manobra obtidas com os dois modelos para um tempo total de operação de 1001,75 s. Em ambos os casos a cota máxima atingida é inferior à cota do nível desejado, para o método *cutting plane* a cota máxima atingida foi de

83,40 m, 8 centímetros superior à da abertura obtida com o algoritmo genético. Para alcançar a cota desejada simplesmente adota-se um maior período de tempo com o valor máximo de abertura e a diferença do tempo é acrescentada no tempo total de manobra.

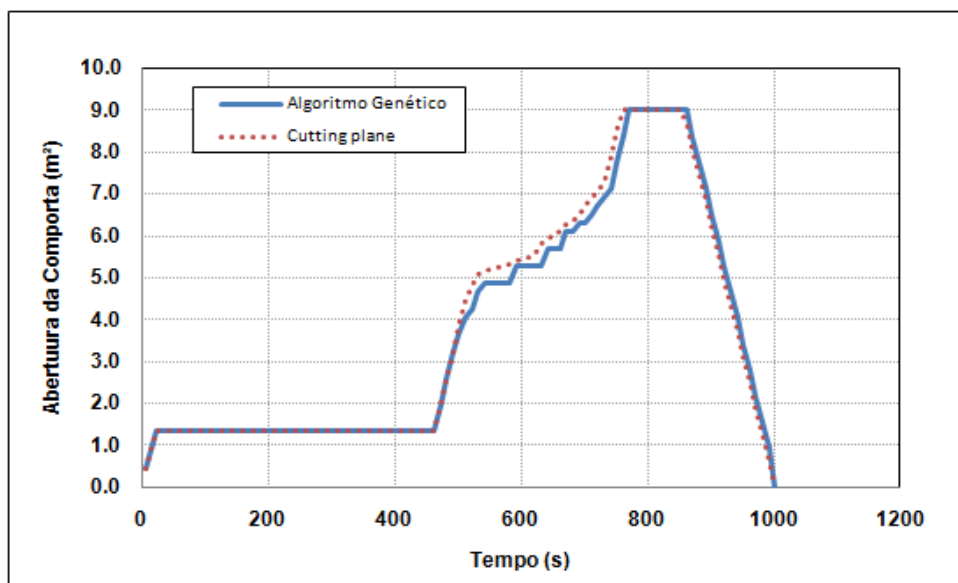


Figura 5.21 – Comparação da manobra otimizada utilizando o método *cutting plane* e o algoritmo genético

É possível concluir que a lei ótima obtida por ambos os métodos de otimização possui a mesma estrutura e valores bastante próximos. A média do valor da diferença entre as duas aberturas finais é menor do que 1%, refletindo assim uma validação do uso do algoritmo genético para otimização de leis de manobras de eclusagem.

No Anexo 3 estão os resultados para o nível, velocidade e aceleração do nível d'água, assim como a restrição de cavitação obtidos pelo método *cutting plane*.

5.4 Aplicação do algoritmo genético para o modelo físico

Dada a aplicação e verificação do modelo proposto para otimização de leis de manobras em eclusas de navegação e da calibração dos coeficientes de perda de carga para o modelo físico foi realizada uma aplicação do modelo desenvolvido para otimização da lei de abertura do modelo físico descrito no item 3.6.2.

As premissas adotadas foram:

- utilização dos coeficientes de contração do jato e das perdas de carga calibradas;

- desnível total de montante a jusante de 83 centímetros;
- velocidade inicial do nível d'água na câmara da eclusa igual a 0 m/s;
- cota do nível d'água inicial na câmara da eclusa igual à cota do nível d'água de jusante;
- término da manobra com as comportas fechadas; e
- dimensões da eclusa iguais as valores da Tabela 3.2.

Para a aplicação do modelo AG algumas adaptações são necessárias, pois o servo-mecanismo do modelo físico possui duas limitações operacionais. A primeira limitação é que a etapa de fechamento das comportas deve ocorrer igual à etapa de abertura de maneira inversa, ou seja, espelhada em relação ao tempo médio de manobra. A segunda limitação é o fato de o servo mecanismo permitir apenas 7 mudanças de velocidades durante a etapa de abertura e conseqüentemente 7 mudanças na etapa de fechamento, entretanto essas 7 iguais às da etapa de abertura.

A primeira limitação do servo-mecanismo foi facilmente resolvida, pois o tempo inicial total de manobra é fixo. Portanto, otimizou-se a lei de abertura para a primeira metade dos intervalos de tempos e igualou-se a segunda metade dos intervalos de forma igual ao valor de abertura equidistante da metade do tempo da lei de manobra.

Para a resolução da segunda limitação existem duas alternativas. A primeira é, dada a implementação da resolução para a primeira limitação, propor uma aproximação manual da lei de manobra ótima obtida de forma que ocorram apenas 7 mudanças de velocidades durante cada etapa de manobra. A segunda alternativa é adaptar o modelo de tal forma que cada indivíduo (lei de manobra) possua apenas 7 variáveis no tempo. A primeira alternativa, apesar de menos elegante, é a mais viável, pois para a segunda alternativa proposta é necessário determinar o espaçamento de tempo entre cada variável, podendo ser com valores diferentes. Para uma correta escolha dos valores de tempo é necessário uma avaliação de sensibilidade quanto à influência dos valores escolhidos na resposta final. A primeira alternativa foi executada por ser uma solução satisfatória e de mais fácil aplicação.

Valores de velocidades do servo-mecanismo

Como elucidado no item 3.4, o AG utiliza um número finito de valores possíveis para as variáveis. Para evitar indivíduos muito compridos e conforme o bom desempenho para a

eclusa de Promissão, optou-se por manter 4 valores de velocidades de abertura da comporta, os quais foram escolhidos embasados nos ensaios realizados no LAHE. O valor da máxima velocidade utilizada nos ensaios transientes foi equivalente a uma abertura total em 45 segundos. Portanto, além da velocidade nula de abertura, os outros 3 tempos de abertura total foram:

- 45 segundos;
- 90 segundos; e
- 180 segundos.

Outra importante etapa para aplicação é a definição das restrições. Para tal etapa, realizou-se primeiramente uma avaliação do comportamento hidráulico para uma abertura ótima sem restrições.

Como era de se esperar, na Figura 5.22 ilustra-se a manobra otimizada encontrada com máxima velocidade de abertura.

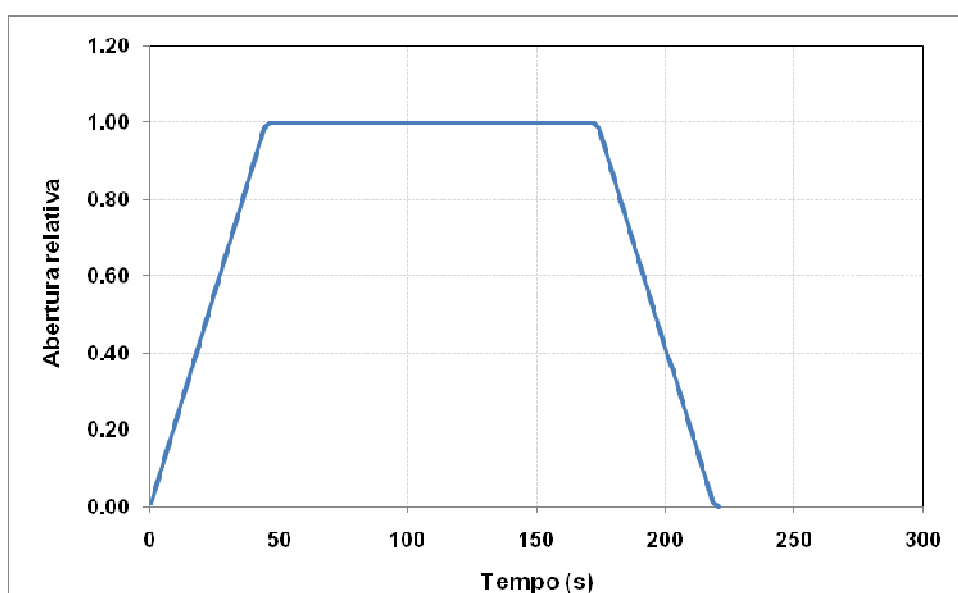


Figura 5.22 – Lei com máxima velocidade de abertura

Na Figura 5.23 ilustra-se o perfil de velocidade de subida da água na câmara, sendo o máximo valor encontrado de $7,12 \cdot 10^{-3}$ m/s no instante de tempo aproximado de 40 segundos após o início da manobra.

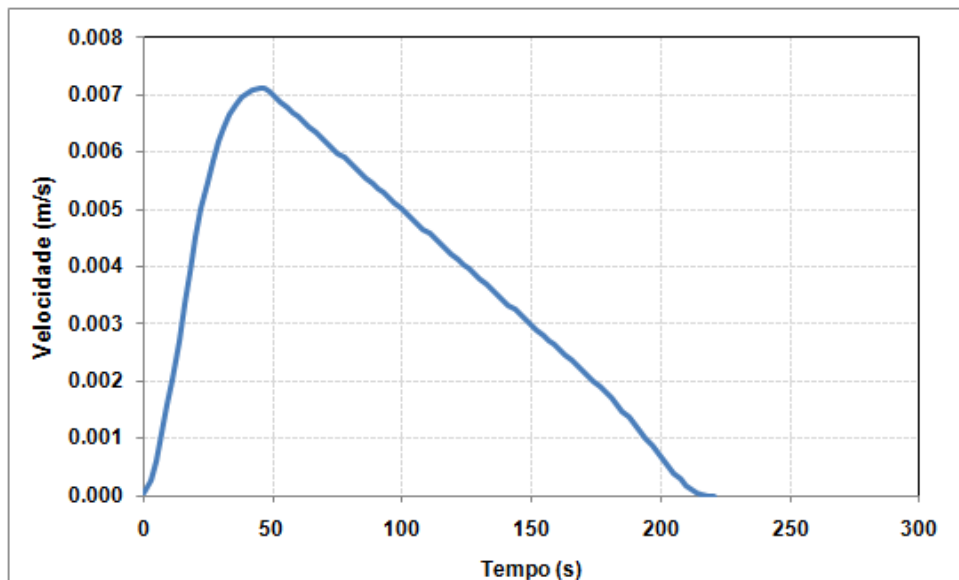


Figura 5.23 – Perfil de velocidade para abertura de máxima velocidade

Devido a características e dimensões do modelo físico o fenômeno de cavitação não foi observado. O menor índice de cavitação encontrado permanece muito superior ao valor crítico. Para um segundo cenário, aplicou-se a restrição da velocidade de subida como valor máximo de 0,005 m/s, representado uma diminuição de 30% da velocidade máxima observada.

Na Figura 5.24 ilustra-se, à base de comparação, o novo perfil de velocidades para esse segundo cenário com restrição de velocidade e o perfil do primeiro cenário sem restrições. Já na Figura 5.25 são apresentadas as duas leis de abertura encontradas.

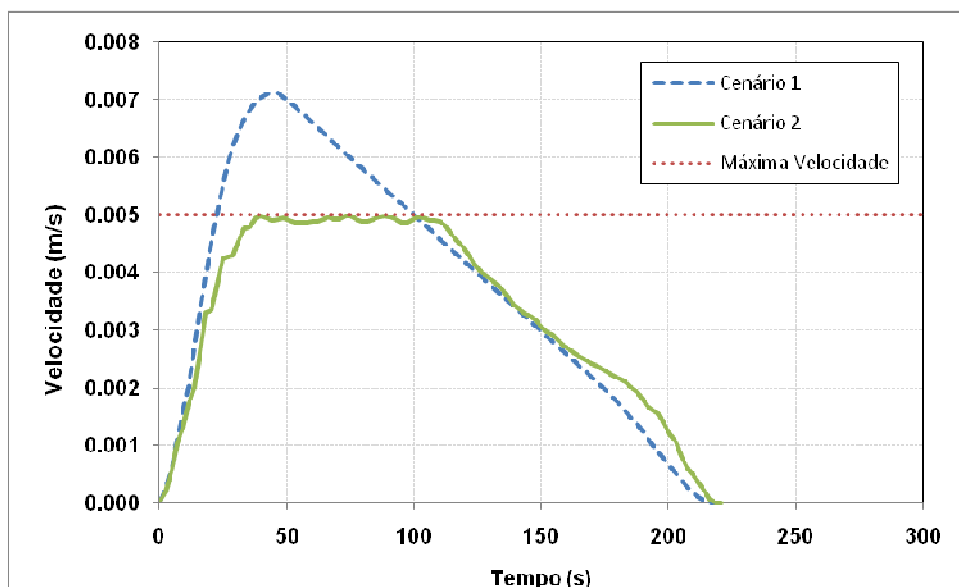


Figura 5.24 – Perfis de velocidades de subida do nível d'água

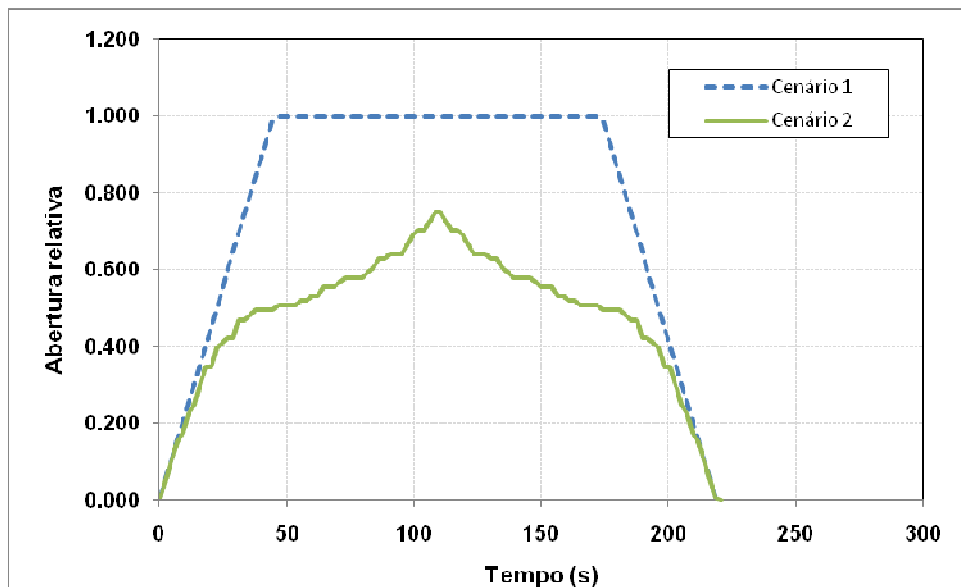


Figura 5.25 – Comparação das leis de manobras otimizadas

Conforme a Figura 5.25 o modelo mostrou ser capaz de obter uma lei de abertura dentro dos padrões estabelecidos de velocidade de subida do nível d'água. Como a lei de abertura não alcança o valor de abertura total da comporta durante a manobra, foi desabilitada a segunda função interna do modelo que adapta a lei para uma abertura total das comportas. Entretanto, é imprescindível a análise do nível d'água final alcançado com a lei de abertura. Mostra-se na Figura 5.26 que, para o primeiro cenário, a cota do nível d'água alcançado na câmara da eclusa no final da operação de 220 segundos é igual àquela de montante, mas para o segundo cenário o tempo total não foi suficiente, sendo necessário um valor de Δt superior a 2,2 segundos.

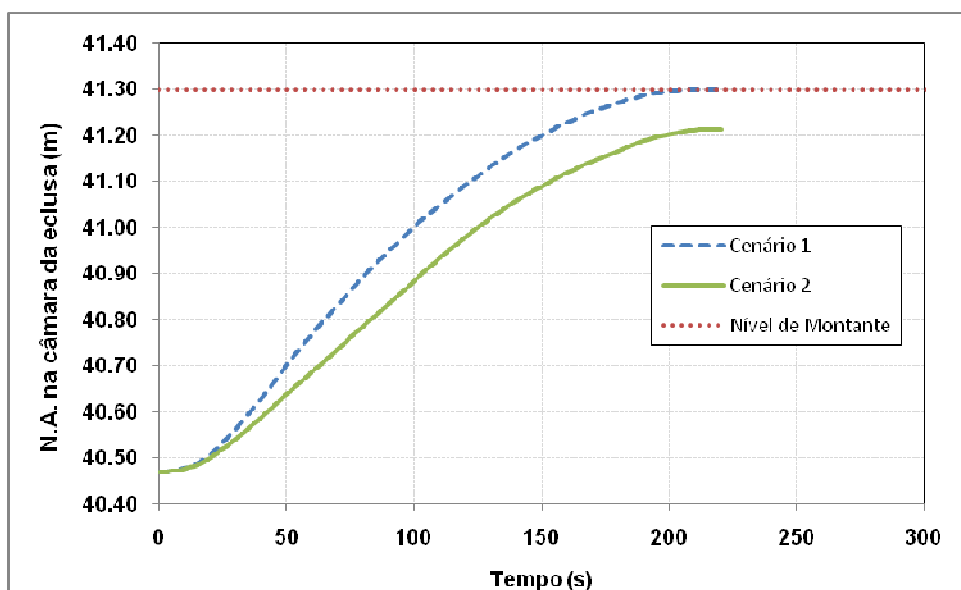


Figura 5.26 – Comparação da evolução do N.A.

Nas Figuras 5.27 a 5.29 são ilustradas a lei de abertura otimizada e o comportamento hidráulico para a manobra de abertura que possibilita que a cota do nível d'água na câmara da eclusa alcance a cota do nível d'água de montante com um tempo total de operação de 208 segundos. O Cenário 2b corresponde ao cenário 2 com o valor de Δt igual a 2,8 segundos.

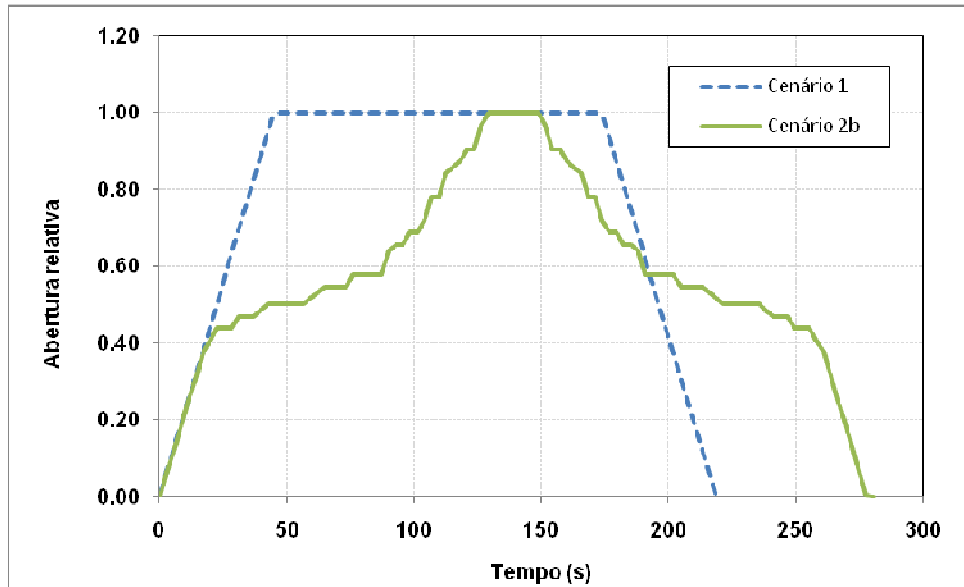


Figura 5.27 – Comparação das leis de manobras otimizadas

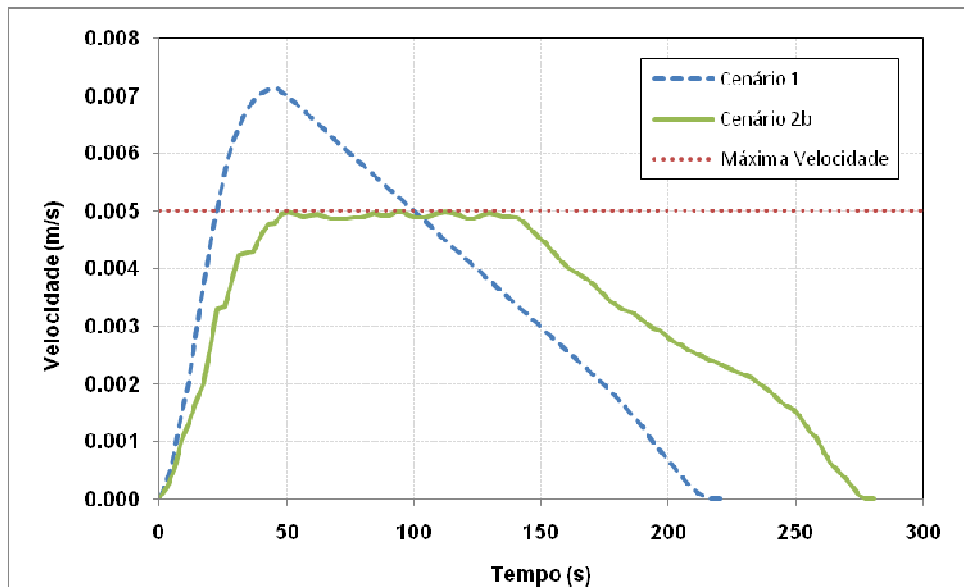


Figura 5.28 – Comparação da evolução da velocidade de subida do N.A.

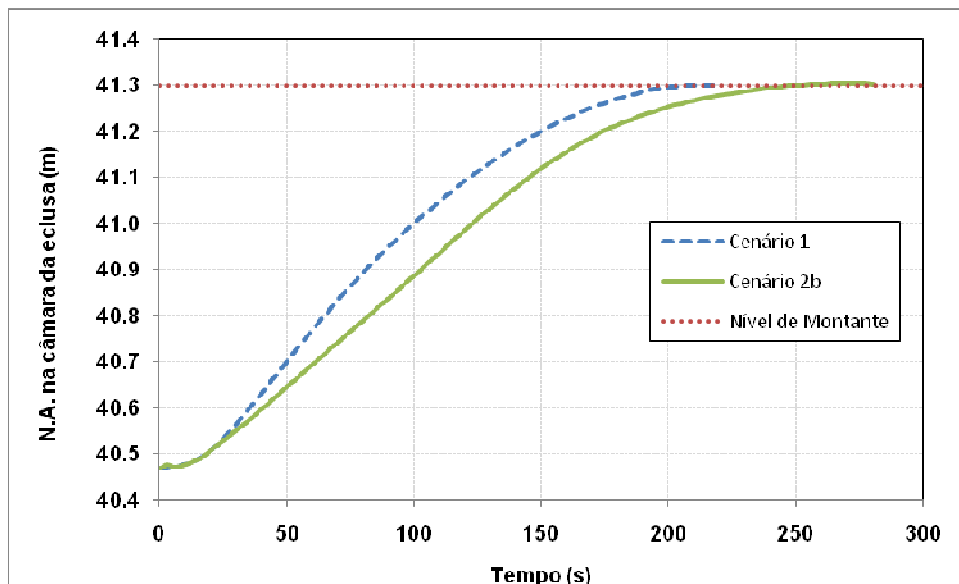


Figura 5.29 – Comparação da evolução do N.A.

O valor máximo de abertura é alcançado e a cota do nível d'água de montante é atingida com um tempo total de 252,5 segundos, mantendo-se a velocidade de subida do nível d'água inferior ao limite de 0,005 m/s.

A lei obtida no cenário 2b foi modificada devido às limitações do servo-mecanismo das comportas de operação. Na Figura 5.30 são mostradas a lei original e a lei adaptada, esta referenciada como cenário 2c.

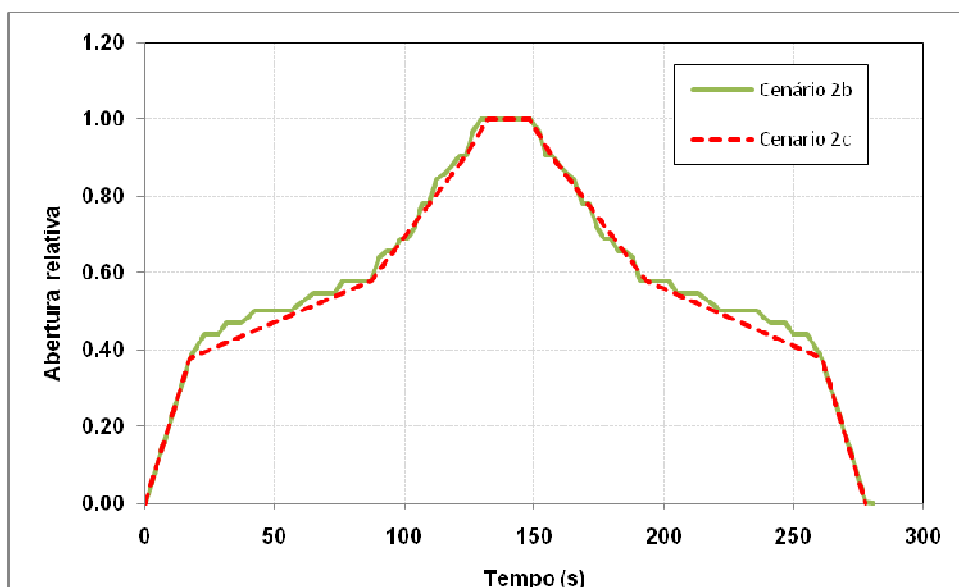


Figura 5.30 – Adaptação da lei ótima devido a limitações do servo-mecanismo

A adaptação realizada está a favor da segurança, ou seja, a abertura está, nos pontos críticos, abaixo do valor ótimo alcançado. Portanto, a cota do nível d' água alcançado será

ligeiramente inferior. Para que as cotas de nível d'água na câmara e a montante sejam iguais ao final da operação, o tempo em que a comporta permanece com a abertura máxima deve ser acrescido em 28 segundos.

Na Figura 5.31 é mostrada a comparação das duas leis de manobras.

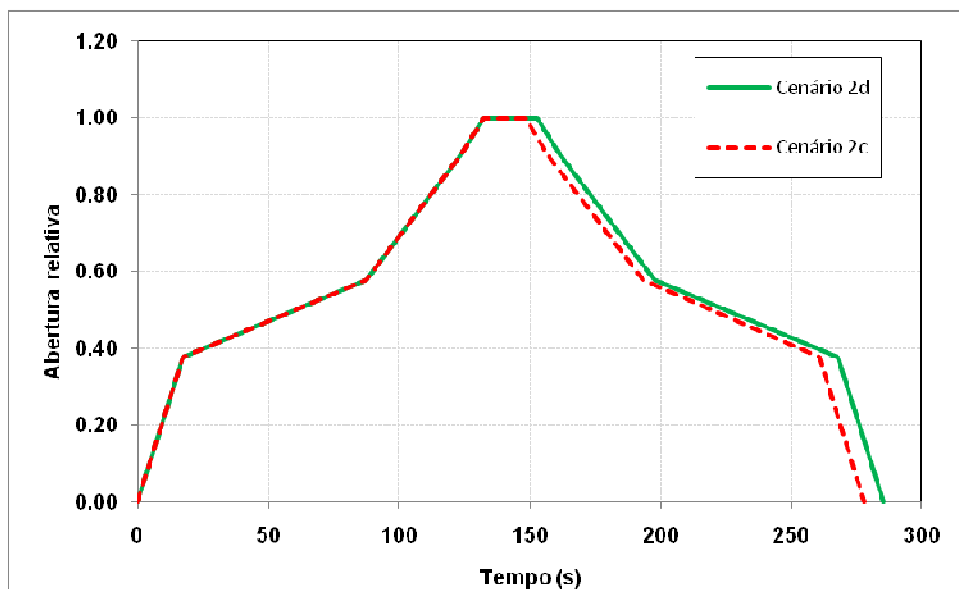


Figura 5.31 – Acréscimo do tempo da lei de abertura para o modelo físico

A lei de manobra de abertura adaptada para o modelo físico, referenciada na Figura 5.31 pelo cenário 2d, estará dentro do limite de velocidade de subida da água, pois, conforme indicado na Figura 5.28, para a lei ótima obtida pelo algoritmo genético (Cenário 2b) a velocidade de subida do nível d'água começa a diminuir mesmo com a comporta estando totalmente aberta.

6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Os resultados para as diferentes leis de manobras realizadas no modelo de simulação, iguais às manobras realizadas no modelo físico, mostram que os valores dos coeficientes de perda de carga utilizados no modelo de simulação permitem inferir de maneira eficiente o comportamento hidráulico da eclusa, pois os resultados encontrados são bastante próximos para a evolução da cota do nível d'água na câmara da eclusa e satisfatórios para o perfil de sua velocidade de subida. O fato do comportamento de velocidade apresentar algumas diferenças em seu comportamento provavelmente reside no fato do coeficiente de perda de carga de montante e de jusante utilizados serem constantes, ou seja, não possuem variação com valores diferentes de vazões ou de velocidade. Fica como recomendação a avaliação do uso de coeficientes de perda de carga variáveis.

O modelo de simulação mostrou-se apto a representar o comportamento hidráulico da eclusa em diferentes leis de manobras, com permanência das comportas abertas no final da manobra ou com elas fechadas, velocidades de aberturas constante ou variando ao longo do tempo. Portanto, o modelo mostrou-se uma boa ferramenta para avaliação do comportamento hidráulico de eclusas de navegação para diversos casos de aplicações em diferentes eclusas com diversas leis de manobras.

O modelo de otimização, utilizando algoritmo genético, foi primeiramente analisado comparando-se os resultados obtidos com o método *cutting plane* de otimização para a eclusa de Promissão, localizada no rio Tietê, no estado de São Paulo. Com as mesmas condições iniciais e com as mesmas restrições em ambos os modelos, a lei ótima de abertura encontrada foi bastante similar. No modelo desenvolvido com o uso do algoritmo genético só foram utilizados 4 valores de velocidade de abertura da comporta, porém, esse valor, apesar de reduzido, mostrou-se suficiente para alcançar o valor ótimo em poucas interações, mostrando que a metodologia utilizada no algoritmo genético, mesmo de maneira discreta, possui grande abrangência na varredura no espaço de soluções, alcançando a lei de abertura ótima bastante próxima ao modelo que utiliza o método *cutting plane*. Fica como recomendação para situações mais complexas, como, por exemplo, um maior número de restrições para o problema, a avaliação do desempenho e da necessidade de utilização de um número de velocidades de abertura maior.

As principais vantagens da utilização do método de algoritmo genético para otimização da lei de abertura de comportas em eclusas de navegação são a fácil implementação de valores específicos de velocidades para o servo mecanismo das comportas e a não necessidade de linearização das equações de restrições. Portanto, para eventuais situações em que diferentes restrições devem ser respeitadas durante as leis de manobras, o uso de algoritmo genético para a busca do ótimo torna-se uma boa alternativa e de fácil implementação.

Outra grande vantagem do método de algoritmo genético é a aplicação com servos mecanismos que não possibilitam um valor contínuo de velocidades de abertura para as comportas, mas apenas um número restrito de valores de velocidades.

O algoritmo genético possui a desvantagem de não assegurar a obtenção do ótimo global. Mas, com uma população com grande número de indivíduos, julga-se obter um resultado bastante próximo ao ótimo global, conforme foi obtido na comparação com o método *cutting plane* para aplicação na eclusa de Promissão.

Para a aplicação do algoritmo genético no modelo físico o modelo matemático mostrou-se bastante útil por possibilitar adaptações ocasionadas por limitações operacionais do servo-mecanismo das comportas e também por facilitar decisões quanto à escolha das leis de manobras a serem utilizadas dentro de critérios previamente estabelecidos. Portanto, o modelo mostrou-se bastante maleável e de fácil adaptação para representar diferentes condições de operação. Para a aplicação do método para eclusa de Promissão o uso de funções auxiliares para geração de indivíduos fisicamente possíveis, e que também apresentassem a característica de abertura total durante a lei de manobra, mostra que o método também é maleável para casos em que a lei terá que possuir alguma característica obrigatória, acelerando a obtenção do ótimo para critérios impostos.

Por fim, o uso do algoritmo genético é fortemente recomendado para aplicações em eclusas de navegação por mostrar-se facilmente adaptável a limitações operacionais e possibilitar inserções de restrições hidráulicas de maneira simples, obtendo leis de manobras dentro de parâmetros e critérios desejados.

Os métodos de resolução da equação geral do escoamento testados, a saber, o método de Runge-Kutta de quarta ordem e o uso da transformada de Laplace mostram um comportamento hidráulico bastante similar um com o outro. Portanto, cabe ressaltar que outra

vantagem do uso de algoritmo genético como metodologia de otimização da lei de abertura é a fácil adaptação do modelo para o uso de diferentes métodos de resolução da equação diferencial do escoamento. Portanto, para eventuais aplicação com algum método de resolução diferente dos testados a metodologia descrita no corpo da dissertação ainda pode ser utilizada.

Como observação final para a aplicação do modelo de otimização no modelo físico, reforça-se o fato de que a restrição de cavitação não foi fator limitante para a obtenção da lei ótima. Ou seja, ela não apresentou em nenhum intervalo de tempo como a restrição limitante ao valor de velocidade de abertura das comportas. Porém, é evidente que em eclusas de navegação existentes a cavitação é sim uma restrição limitante à operação das comportas. Assim, recomenda-se verificar como considerar as condições de cavitação do protótipo com base em valores dos coeficientes do índice de cavitação medidos no modelo físico para auxiliar de maneira mais efetiva um bom comportamento hidráulico em relação à presença de cavitação nas leis de manobras aplicadas.

Recomenda-se, ainda, desenvolver no modelo físico mecanismo de medição de força de amarração causada pela geração de ondas na câmara da eclusa e obter um equacionamento para tal fenômeno, o que permitirá inserir no modelo de otimização a restrição da força de amarração que limite o seu valor a um máximo dentro de critérios de segurança.

Fica claro que o tema abordado não foi esgotado, possuindo ainda diferentes questões a serem avaliadas e aprofundadas, porém julga-se que a pesquisa realizada mostrou-se bastante ampla e de grande valor.

REFERÊNCIAS

ACP - AUTORIDAD DEL CANAL DE PANAMÁ. *Simulación hidráulica de sistemas de esclusas de navegación, División de Proyectos de Capacidad Del Canal*, Departamento de Ingeniería e Proyectos, Agosto 2005.

ACP - AUTORIDAD DEL CANAL DE PANAMÁ. *Modelos numéricos y físicos para el diseño conceptual del sistema de llenado y vacinado y de navegación del tercer juego de esclusas*, Universidade Tecnológico de Panamá, Agosto 2007.

AHIMOR - ADMINISTRAÇÃO DAS HIDROVIAS DA AMAZÔNIA ORIENTAL. *Eclusas de Tucuruí*, Agosto. 2005. Disponível em: <<http://www.ahimor.gov.br/eclusas/index.htm>>. Acesso em jun. de 2010.

ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. *A navegação interior e a sua interface com o setor de recursos hídricos*. Caderno de Recursos Hídricos, Coord.: Gondim Filho, J. G. C. Brasília, mai 2005.

ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice No. 94. *Inland navigation: locks, dams, and channels*. 375 p. 1998

BEASLEY, D.; BULL, D. R.; MARTIN, R. R. *An overview of genetic algorithms: Part 2, Research Topics*. University Computing 170-181 p. 1993.

BOYCE, W. E.; DIPRIMA, R. C. *Elementary differential equations and boundary value problems*. 7ª ed. Editora: LTC, 2002, 158 p.

BRANT, J. M. C. *Otimização de redes de distribuição de águas de abastecimento por meio de algoritmo genético*. Dissertação (Programa de Pós-graduação em Sanemaneto, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Escola de Engenharia, UFMG, Belo Horizonte, 2002.

BRANT, J. M. C.; NAGHETTINI, M.; PALMIER, L. R. *Otimização de redes de distribuição de água utilizando algoritmo genético*. XIV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos e V Simpósio de Hidráulica e Recursos Hídricos dos Países de Língua Oficial Portuguesa. Aracaju, Sergipe, 2001.

BRASIL, Ministério dos Transportes-MT. Banco de informações e mapas de transporte - BIT. Disponível em: <<http://www.transportes.gov.br/bit/hidro/hidro.htm>>. Acessado em: 21 junho 2010.

CÂMARA JÚNIOR, A. C. *Suporte à decisão para o planejamento agrícola utilizando algoritmo genético*. Dissertação (Programa de Pós-graduação em Sanemaneto, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Escola de Engenharia, UFMG, Belo Horizonte, 2005.

CÂMARA JÚNIOR; PALMIER, L. R.. *Suporte à decisão para o planejamento agrícola utilizando algoritmos genéticos*. In: XVI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2005, João Pessoa. XVI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2005.

COLAMUSSI, A.; DESIDERIO, A.; D'AMICO, R. *Rappresentazione matematica dei processi di livellamento in una conca di navigazione ad acquedotti laterali. Ottimizzazione del processo*. Giornale del Genio Civile, 19 p. 1974.

CPP - CONSÓRCIO POST-PANAMAX, *Physical model study of filling and emptying systems and conceptual design for third set of locks*, Panamá, jun. de 2008

CTGPC - CHINA THREE GORGES PROJECT. *Brief introduction to Three Gorges Project*. China Three Gorges Corporation, 2002. Disponível em: <<http://www.ctgpc.com.cn/en/index.php>>. Acesso em: 5 de ago.2010.

DINIZ, L. S. Regionalização de parâmetros de modelo chuva-vazão usando redes neurais. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Instituto de Pesquisas Hidráulicas. Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental. 2008

ELDER, R. A.; PRICE J. T.; ENGLE W. W. *Navigation Lock: TVA's Multiport Lock Filling and Emptying System*. *Journal of the Waterways and Harbors Division*, ASCE, Vol. 90, p. 31-46, 1964.

FERNANDES, C. T. C.; BURSZTYN, M. A. A. Usos múltiplos das águas de reservatórios de grandes hidrelétricas: perspectivas e contradições ao desenvolvimento regional sustentável. Anais do IV Encontro Nacional da Associação Nacional de Pós-graduação e Pesquisa em Ambiente e Sociedade. Brasília: ANPPAS, 2008.

FERNANDEZ, J. C., O princípio dos usos múltiplos dos recursos hídricos: Uma análise a partir da bacia do Rio Formoso no Oeste Baiano. *Revista Econômica do Nordeste*, Fortaleza, v. 31. Especial p. 810-835, nov. 2000.

FREEMAN, J. R. *Hydraulics laboratory practice*. New York, ASME, 826p. 1929. *apud* Tondowski, Leon., Modelos reduzidos e efeitos de escala em eclusas de navegação. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 259 f. 1987.

GEN, M; CHEN, R. *Genetic algorithms and engineering design*. New York: John Wiley & Sons, 378p. 1997.

GOLDBERG, D. E. *Genetic algorithms in search, optimization and machine learning*. Addison-Wesley Publishing Company. Reading, Massachusetts, 412 p. 1989. *apud* Câmara Júnior, A. C., Suporte à decisão para o planejamento agrícola utilizando algoritmo genético, Belo Horizonte, 2005).

GRIFFIN, A. F. Influence of model testing on lock design. *Transactions*, ASCE, 1951, 116:831. *apud* Tondowski, Leon., Modelos reduzidos e efeitos de escala em eclusas de navegação. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 259 f. 1987.

HEBLER, M. T.; NEILSON, F. M., *Lock filling and emptying-symmetrical systems*, MP H-76-13, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, Miss., Jun 1976

KOLOSOV, M. A. *Safety of navigation locks*, Vol. 36, Petersburg State University for Water Communications, Russia, 2002.

MARQUES, M. G.; PRÁ, M. D.; PALAURO, C.; CAMAÑO, E. B.; MEES, A. A.; KEMPKA, M. *Perdas de carga no regime de esvaziamento e enchimento de eclusas de navegação*, Relatório interno de pesquisa, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

MCNOWN, J. S. *Fluid mechanics and lock design*, Proc. Paper 5365, *Journal of the Waterways and Harbors Division*, ASCE, 1967.

MCNOWN, J. S, *Mechanics of manifold flow*, Paper 2714, Vol. 119, *Transactions of the American Society of Civil Engineering*, 1954.

MICHALEWICZ, Z.; DASGUPTA, D.; LE RICHE, R. G.; SCHOENAUER, M. *Evolutionary algorithms for constrained engineering problems*, Computers & Industrial Engineering Journal, Vol.30, No.2, pp.851-870. Set. 1996.

NATALE, L., SAVI, F. *Minimization of filling and emptying time for navigation locks* Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, Vol. 126, No. 6, nov. 2000

NEUTZLING, I. Água: bem público universal, Universidade do Vale dos Sinos, Rio Grande do Sul, 2004.

PALMIER, L. R. Otimização das leis de manobra de comportas dos circuitos enchimento e esgotamento de eclusas de navegação, Dissertação de mestrado, COPPE-UFRJ, Rio de Janeiro, 1990.

PALMIER, L. R.; NAGHETTINI, M. C. Otimização do método de Muskingum não linear utilizando algoritmo genético. In: XIV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2001, Aracaju. Anais do XIV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Aracaju, 2001.

PATANKAR, S. V. *Numerical heat transfer and fluid flow*, Estados Unidos da América, 197 p. 1980.

PERRUPATO, M. Plano Nacional de Logística e Transporte – PNLT. Estágio atual e Continuidade. Brasília, 25 de novembro de 2009.

PETRY, B.; PALMIER, L. R. A transformada de Laplace como instrumento para análise numérica de oscilações de massa em eclusas de navegação. Revista Brasileira de Engenharia JCR, v.9, n.1, 1991.

RE, F.; MENÉNDEZ A. N.; BADANO N. D.; GERBEC M. S; LECERTÚA E. A.; RE, M. *Modelación numérica del tercer juego de esclusas del canal de Panamá para el estudio de alternativas de diseño. XXIV Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Punta del Este, Uruguay, nov. 2010*

RONSI, A.; BARROS, A.; ALMEIDA, C. E.; USSAMI, H.; CORADINI, L. Leis de manobra de válvula em sistemas de enchimento e esvaziamento de eclusas de navegação, São Paulo 1988.

ROSA, D. J. M. Plano nacional de recursos hídricos, ANA – Agência Nacional de Águas, 13 de jul. 2005.

SANTOS, R. S, Profundidade mínima em eclusas de navegação interior – Estudo em modelo reduzido. Dissertação de mestrado USP – São Paulo, 1993.

SCHOHL, G. A., *Model test result of various lock design modification*, Tennessee Valley Authority, 1978.

SCHOHL, G. A.; HUBBLE, J. D.; BENTON D. J; BOWMAN C. F. *EZFLOW, a quality assured intuitive computer code for hydraulic analysis of pipe networks*, International Joint Power Generation Conference and Exposition, Minneapolis, 1995.

SCHOHL, G. A., User's Manual for LOCKSIM: *Hydraulic simulation of navigation lock filling and emptying systems*, Mississippi: Research Library US army Engineer Waterways; jan. 1999.

SERRET, G. R.; MATEOS, C.; ELVIRO, V.; REDONDO, L.; JIMENO, F. Ensayos en modelo físico para el estudio náutico de la nueva esclusa del Puerto de Sevilla, XXIII Congreso Latino Americano de Hidráulica, Cartagena de Índias, Colômbia, set. 2008.

- STOCKSTILL, R. L.; NEILSON, F. M.; ZITTA, V. L. *Hydraulic calculations for flow in lock manifolds*. *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 117, No 8, ago. 1991.
- STOCKSTILL, R. L. *Mooring model coefficients for barge tows in a navigation lock*. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, Vol. 129, no 5, set. 2003.
- SWEDES, G., *A rare look at the Ballard locks*, Novembro 2009. Foto disponível em: <<http://www.myballard.com/2009/11/17/a-rare-look-at-the-locks>>. Acesso em 3 de out. de 2010.
- THEMAG ENGENHARIA, Estudos hidráulicos especiais da eclusa de Promissão, Centrais Hidrelétricas de São Paulo S.A. (CESP), 1987.
- TONDOWSKI, L. Modelos reduzidos e efeitos de escala em eclusas de navegação. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 259 f. 1987.
- USSAMI, H. Comportamento hidráulico dos sistemas de enchimento e esgotamento de eclusas de navegação. Dissertação de mestrado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 1980.
- USACE – U. S. Army Engineer Waterways Experiment Station. Hydraulic design criteria. 18^a ed, Vicksburg, MS, 1988. *apud*. Schohl, G. A., User's Manual for LOCKSIM: *Hydraulic simulation of navigation lock filling and emptying systems*, Mississippi: Research Library U.S. Army Corps of Engineers Waterways; jan. 1999
- WHITLEY, D. *A genetic algorithm tutorial*. Computer Science Department, Colorado State University, Fort Collins, EUA, 1993
- WINDSOR, J. S.; VALLEE, H. *Computer model for a lock manifold systems*. Paper 6553, *Journal of the Waterways and Harbors Division* – ASCE, may 1969.
- WONG, H. J. *Programa de ampliación del canal y diseño del tercer juego de esclusas*, Pacífico Departamento de Ingeniería y Administración de Programas, set. de 2008.

APÊNDICE 1

APÊNDICE 1 – COMANDOS PARA MODELO DE SIMULAÇÃO COM O MÉTODO DE RUNGE-KUTTA DE 4ª ORDEM

```
// Programa que resolve a equação diferencial do
//escoamento turbulento para enchimento de uma eclusa
//Utilizando o método clássico de Runge-Kutta.
```

```
#include <stdlib.h>
#include <stdio.h>
#include <math.h>
```

```
float h=1.0;
float a1=0.0001;
float a2=0.00013; //0.00013
float Ac=6000.0; //tb declarado no int
float Zref=30.0;
float A1=20.0; //tb declarado no int
float w =pow(9.81*A1/(200.0*Ac),0.5);
```

```
float f1(float V){
    float f1=0.0;
    f1= V;
    return(f1);
}
```

```
float f(float V, float L){
    float f=0.0;
    f= V+(0.5*L*h);
    return (f);
}
```

```
float f4(float V, float L){
    float f4=0.0;
    f4= V+(L*h);
    return(f4);
}
```

```
float g1(float av,float V,float Z){
    float g1=0.0;
    g1= -(a1+a2+av)*w*w*Ac*Ac*V*fabs(V) -w*w*(Z-Zref);
    return(g1);
}
```

```
float g(float av,float V,float Z,float S,float L){
    float g=0.0;
    g= -(a1+a2+av)*w*w*Ac*Ac*(V+ (0.5*L*h) )*(fabs(V+ (0.5*L*h) ))- w*w*(Z+
(0.5*S*h-Zref) );
    return(g);
}
```

```
float g4(float av,float V,float Z,float S,float L){
    float g4=0.0;
    g4= -(a1+a2+av)*w*w*Ac*Ac*(V+(L*h))*fabs(V+(L*h))- w*w*(Z+(S*h)-Zref);
    return (g4);
}
```

```

float interpol(float Kv1,float Kv2,float pD,float pD1,float pD2){
    float Kv=0.0;
    Kv= Kv1+(Kv2-Kv1)*(pD-pD1)/(pD2-pD1);
    return (Kv);
}
int main ()
{
    FILE *p,*s,*r;
    int i,t,Tf,max=3000;
    float n,j;
    float V[max],Z[max],av[max],Kv[max],A1,pD[max],A[max],G,h,t1,t2,T,Ac; //pD= d/D
=abertura parcial da comporta
    float S[40],L[40],tab[40][4];
    Tf=2500; //tempo de operação (s)
    for(i=1;i<=40;i++){
        S[i]=0;
        L[i]=0;
    }
    for(t=0;t<=Tf;t++){
        Kv[t]=0.0;
        pD[t]=0.0;
        av[t]=0.0;
        V[t]=0.0;
        Z[t]=0.0;
    }
    V[0]=0.0;
    Z[0]=0.0;
    Zref=30.0;
    A1=20.0;
    Ac=6000.0;
    T=180.0; //tempo para abertura da comporta
    G=9.81;
    h=1.0;
//Lendo os valores tabelados de Cc e seu respectivo pD
    i=1;
    p = fopen("valorKvtab.txt","r");
    while (!feof(p))
    {
        fscanf(p,"%f",&tab[i][1]);
        fscanf(p,"%f",&tab[i][2]);
        //printf("Pdscan= %f ",tab[i][1]);
        //printf("Kvscan= %f\n",tab[i][2]);
        i++;
    }
    n=i;
    fclose(p);
    s =fopen("valorKpal.txt","w");
    fprintf(s,"COEFICIENTES DE PERDA DE CARGA NA COMPORTA (Kv) \n\n");
    //tab[abertura da comporta][Cc]
    for(i=2;i<n;i++)

```

```

{
t1=(tab[i-1][1])*T;
t2=(tab[i][1])*T;
//printf("t1 =%f t2=%f\n",t1,t2);
for(j=t1;j<t2;++j)
{
t=(int)j;
pD[t]= (1.0/T)*t;

if( pD[t]< tab[i][1])
{
Kv[t] = interpol(tab[i-1][2], tab[i][2], pD[t], tab[i-1][1], tab[i][1]);
fprintf(s,"Kv = %f    pD= %f    t= %d\n",Kv[t], pD[t], t);
}
}
}
fclose(s);
//Para abertura total
for(j=T;j<=1000;j++){
t=(int)j;
Kv[t]=0.0;
}
//Calculo dos valore av[t]
for(t=0;t<=Tf;t++)
{
av[t]=Kv[t]/(2.0*G*A1*A1);
// printf("av = %f t= %d\n",av[t],t);
}
printf("Z0 = %f\n",Z[0]);
r=fopen("SaidaPal2.xls","w");
fprintf(r,"Resultado do Nível de água e das velocidades\n\n");
fprintf(r,"Área da câmara(m2): Ac= %.2f Nível da água de montante(m): %.2f Nível da água
de justante(m): %.2f\n",Ac,Zref,Z[0]);
fprintf(r,"Área da comporta(m2): A1= %.2f Tempo de manobra(m2):%.2f \n\n", A1,T);
fprintf(r,"Nível de água (m) Velocidade (m/s) Tempo(s)\n\n");
//Calculando S[i] e L[i] da formulacao Runge-Kutta
for(j=1;j<=Tf;j+=h)
{
t=(int)j;
for(i=1;i<=4;i++)
{
if(i==1){
S[i]=f1(V[t-1]);
L[i]=g1(av[t],V[t-1],Z[t-1]);
}
else if(i==2||i==3){
S[i]= f(V[t-1],L[i-1]);
L[i]= g(av[t],V[t-1],Z[t-1],S[i-1],L[i-1]);
}
else {

```

```

    S[i]=f4(V[t-1],L[i-1]);
    L[i]=g4(av[t],V[t-1],Z[t-1],S[i-1],L[i-1]);
  }
}
Z[t]= Z[t-1]+( S[1]+ (2.0*S[2]) + (2.0*S[3]) +S[4] )*(h/6.0);
fprintf(r,"Z = %f ",Z[t]);
printf("Z = %f",Z[t]);
V[t]= V[t-1]+ ( L[1]+ (2.0*L[2]) + (2.0*L[3]) +L[4] )*(h/6.0);
printf(" V = %f ",V[t]);
A[t]= -(av[t]+a1+a2)*w*w*Ac*Ac*V[t]*fabs(V[t]) -w*w*(Z[t]-Zref);
fprintf(r,"      V = %f      A= %f      t= %d \n",V[t],A[t],t);
printf(" A = %f t %d \n",A[t],t);
}
fclose(r);
system("pause");
}

```

APÊNDICE 2

APÊNDICE 2 – COMANDOS PARA MODELO DE SIMULAÇÃO COM A APLICAÇÃO DA TRANSFORMADA DE LAPLACE

```
// Programa que resolve a equação diferencial do
//escoamento turbulento para enchimento de uma eclusa
//Utilizando as expressões obtidas pela transformada de laplace

#include <stdlib.h>
#include <stdio.h>
#include <math.h>

float h=1.0;
float a1=0.0001;
float a2=0.00013; //0.00013
float Ac=6000.0; //tb declarado no int
float Zref=30.0;
float A1=20.0;
float G=9.81; //tb declarado no int
float w =pow(G*A1/(200.0*Ac),0.5);

float interpol(float Kv1,float Kv2,float pD,float pD1,float pD2){
    float Kv=0.0;
    Kv= Kv1+(Kv2-Kv1)*(pD-pD1)/(pD2-pD1);
    return (Kv);
}

int main ()
{
    FILE *p,*s,*r;
    int i,t,Tf,k;
    float n,j;
    float V[2001],Z[2001],A[2001],av[2001],Kv[2001],pD[2001],t1,t2,T;
    //pD= d/D =abertura parcial da comporta
    float tab[40][4],soma,phi[2001],C,D;
    Tf=1800; //tempo de operação (s)
    for(t=0;t<=Tf;t++){
        Kv[t]=0.0;
        pD[t]=0.0;
        av[t]=0.0;
        V[t]=0.0;
        Z[t]=0.0;
        phi[t]=0.0;
    }
    V[0]=0.0;
    Z[0]=0.0;
    T=180.0;
    //Lendo os valores tabelados de Cc e seu respectivo pD
    i=1;
    p = fopen("valorKvtab.txt","r");
    while (!feof(p))
```



```

    {
        fscanf(p,"%f",&tab[i][1]);
        fscanf(p,"%f",&tab[i][2]);
        i++;
    }
    n=i;
    fclose(p);
s =fopen("valorKpal.xls","w");
fprintf(s,"COEFICIENTES DE PERDA DE CARGA NA COMPORTA (Kv) \n\n");
for(i=2;i<n;i++)
{ t1=(tab[i-1][1])*T; //abertura
t2=(tab[i][1])*T; //Kv
for(j=t1;j<t2;+j)
{
    t=(int)j;
    pD[t]= (1.0/T)*t;

    if( pD[t]< tab[i][1])
    {
        Kv[t] = interpol(tab[i-1][2], tab[i][2], pD[t], tab[i-1][1], tab[i][1]);
        fprintf(s,"Kv = %f    pD= %f    t= %d\n",Kv[t], pD[t], t);
    }
}
fclose(s);
//Para abertura total
for(j=T;j<=Tf;j++){
    t=(int)j;
    Kv[t]=0.0;
}
//Calculo dos valore av[t]
for(t=0;t<=Tf;t++)
{ av[t]=Kv[t]/(2.0*G*A1*A1);
//printf("av = %f t= %d\n",av[t],t);
}
printf("Z0 = %f\n",Z[0]);
printf("w = %f\n",w);
r=fopen("SaidaLAPLPal.txt","w");
fprintf(r,"Resultado do Nível de água e das velocidades\n\n");
fprintf(r,"Área da câmara(m2): Ac= %.2f Nível da água de montante(m): %.2f Nível da água
de justante(m): %.2f\n",Ac,Zref,Z[0]);
fprintf(r,"Área da comporta(m2): A1= %.2f Tempo de manobra(m2):%.2f \n\n", A1,T);
fprintf(r,"Nível de água (m) Velocidade (m/s) Tempo(s)\n\n");
//calculo a VELOCIDADE da agua pelas expressos da transformada de LAPLACE IV.22
for(i=1;i<=Tf;i++)
{ phi[i-1]= ((1.8 + Kv[i-1])/(2*G*A1*A1) ) *Ac*Ac*V[i-1]*fabs(V[i-1]);
soma=0.0;
C=0.0;
for(k=1;k<i;k++)
{soma= soma - w*( phi[k-1]*sin(w*(i-(k-1))) - phi[k]*(sin(w*(i-k))) + ((phi[k]-phi[k-
1])/w)*( cos(w*(i-k))- cos(w*(i-(k-1))) ));
}
}

```

```

C= w*(Zref-Z[0])*sin(w*i) + soma- w*( phi[i-1]*sin(w) - (phi[i-1]/w)*(1.0-cos(w)) );
D= ( (1-cos(w))*(1.8+Kv[i])/(2*G*A1*A1) ) *Ac*Ac;
//printf("C= =%f i= %d\n",C,i);
if( C>=0){
    // printf("C %f \n",C);
    V[i]= (-1.0 +sqrt(1.0+ 4.0*D*C) )/(2*D);
}
if(C<0){
    V[i]= (1.0 -sqrt(1.0- 4.0*D*C) )/(2*D);
}
//("soma[%d]= %f \n",i,soma);
//printf("V[%d]= %f C= %f \n",i,V[i],C);
fprintf(r,"V[%d]= %f \n",i,V[i]);
// printf("V= =%f i= %d\n",V[i],i);}
fprintf(r,"\n\n");
phi[Tf]= ((1.8 + Kv[Tf])/(2*G*A1*A1) ) *Ac*Ac*V[Tf]*fabs(V[Tf]); //faltava definir o
phi[Tf]

//calculo a ACELERAÇÃO da agua pelas expressoes da transformada de LAPLACE IV.51
for(i=1;i<=Tf;i++)
{
    soma=0.0;
    C=0.0;
    for(k=1;k<i;k++)
    {
        soma= soma - w*w*( phi[k-1]*cos(w*(i-(k-1))) - phi[k]*(cos(w*(i-k)) - ((phi[k]-
phi[k-1])/w)*( sin(w*(i-k))- sin(w*(i-(k-1)))) ));
    }
    C = w*w*(Zref-Z[0])*cos(w*i) + soma- w*w*( phi[i-1]*(cos(w) -sin(w)/w) );
    D = ( w*sin(w)*(1.8+Kv[i])/(2*G*A1*A1) ) *Ac*Ac;
    A[i]= C -( D*V[i]*fabs(V[i]) );
    printf("A[%d]= %f \n",i,A[i]);
    fprintf(r,"A[%d]= %f \n",i,A[i]);}
printf("\n\n \n",i,V[i]);
//calculo do NÍVEL da agua pelas expressos da transformada de LAPLACE
for(i=1;i<=Tf;i++)
{
    soma=0.0;
    for(k=1;k<i;k++)
    {
        soma= soma -( phi[k]*cos(w*(i-k)) - phi[k-1]*(cos(w*(i-(k-1)))) + (phi[k]/w-phi[k-
1]/w)*( sin(w*(i-k))-sin(w*(i-(k-1)))) );
    }
    //printf("Soma= %f",soma);
    C= Z[0]*cos(w*i) + Zref*(1-cos(w*i))+soma +phi[i-1]*( cos(w)- (sin(w)/w) );
    D= ( (1.0-(sin(w)/w))*(1.8+Kv[i])/(2*G*A1*A1) ) *Ac*Ac;
    Z[i]= C -( D*V[i]*fabs(V[i]) );
    //printf("phi[%d]= %f \n",i,phi[i]);
    fprintf(r,"Z[%d]= %f \n",i,Z[i]);
}
fclose(r);
system("pause");
}

```

APÊNDICE 3

APÊNDICE 3 – DADOS DE COEFICIENTES DE PERDA DE CARGA

Dados da função valorkvtab

0.0	1000.0
0.03	160.0
0.1	98.0
0.15	57.0
0.2	34.0
0.3	13.0
0.4	8.0
0.5	4.0
0.6	1.0
0.7	0.5
0.8	0.1
0.9	0.01
1.0	0.001

APÊNDICE 4

APÊNDICE 4 – INTERFACE DE SIMULAÇÃO

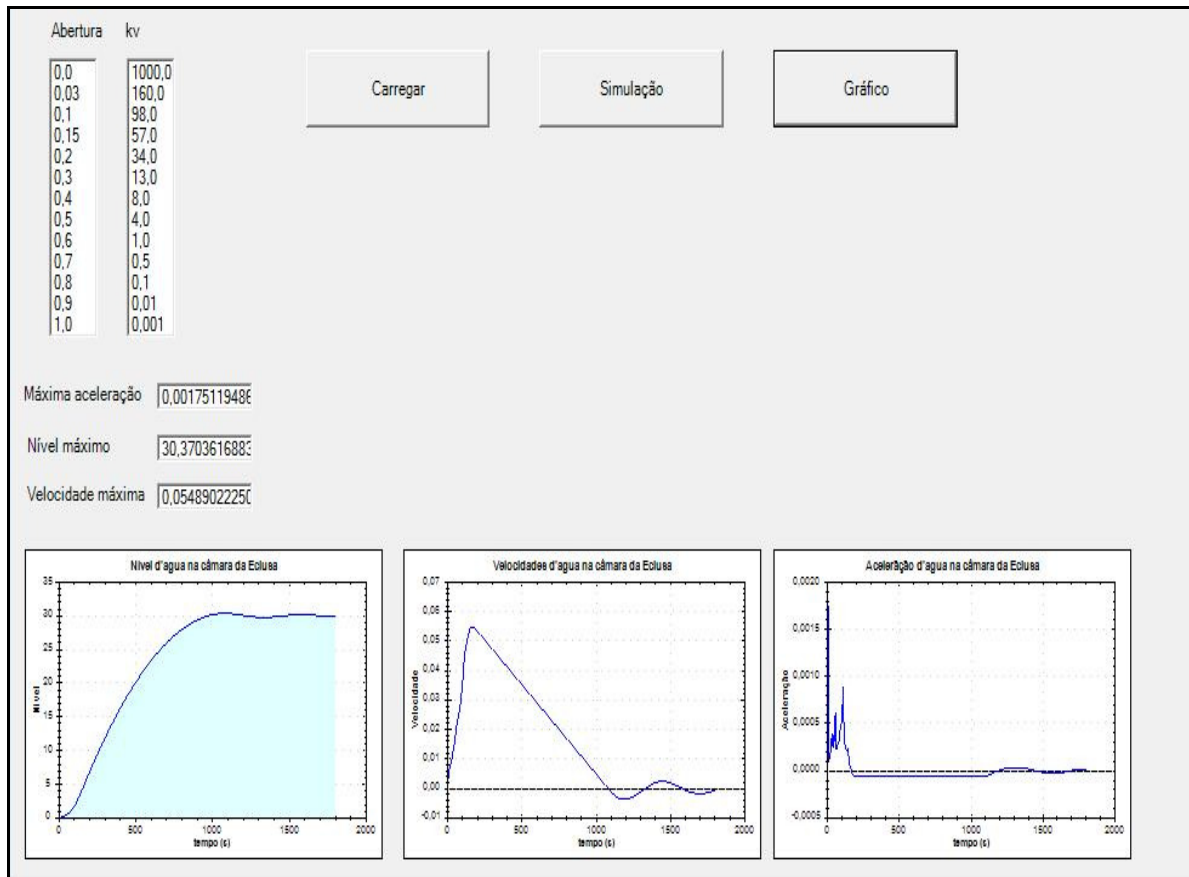


Figura AP.1 – Resultados gráficos de ensaios

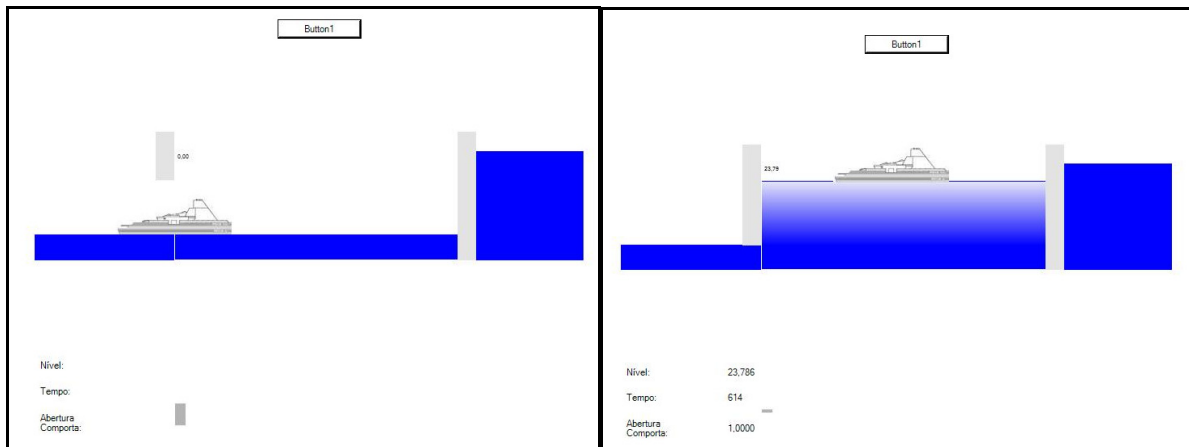


Figura AP.2 – Simulação de transposição de embarcação

APÊNDICE 5

APÊNDICE 5 – ENTRADAS DO MODELO DE SIMULAÇÃO

40.93	40.31	40.13
0.0512	13.57	0.0512 0.0512
0.58	2.32	
0.32	5.45	4.53
9.5		
0.32	0.0512	9.81 0
19	19	19
655	1	
180000		0
107529		0.02
12492.5		0.04
3546.35		0.06
2765.83		0.065
725.79	0.1	
412.01	0.12	
255.27	0.14	
168.62	0.16	
116.97	0.18	
84.33	0.2	
23.94	0.3	
9.8	0.4	
4.9	0.5	
2.79	0.6	
1.73	0.7	
1.14	0.8	
0.79	0.9	
0.57	1	
0.86	0	
0.85	0.02	
0.83	0.04	
0.82	0.06	
0.8	0.08	
0.79	0.1	
0.77	0.12	
0.76	0.14	
0.75	0.16	
0.74	0.18	
0.73	0.2	
0.7	0.3	
0.71	0.4	
0.75	0.5	
0.82	0.6	
0.89	0.7	
0.96	0.8	
0.99	0.9	
1	1	
0.65	0	
0.65	0.1	

0.64	0.15
0.61	0.2
0.56	0.25
0.5	0.3
0.44	0.35
0.43	0.4
0.45	0.45
0.48	0.5
0.5	0.55
0.49	0.6
0.46	0.65
0.4	0.7
0.36	0.75
0.32	0.8
0.31	0.85
0.34	0.9
0	1

ANEXO 1

ANEXO 1 – RESULTADOS DOS ENSAIOS REALIZADOS POR COLAMUSSI *et al.*

	H (m)	h (m)	β_0	t_a (sec)	α	b_0		T (sec)	V_{RIS} (m/min)	V_{an} (m/sec)		V (m/sec)	t_r (sec)
										max	min		
A	8,8	3,5	0,4313	60	0,5	0,7964		209	2,37	0,622	0,176	6,128	70
B	8,8	3,5	0,3999	60	0,5	1,5		226	2,19	0,408	0,143	5,657	70
C	8,8	3,5	0,4313	30	0,5	0,7964		196	2,45	0,835	0,187	6,35	50
D	8,8	3,5	0,3999	30	0,5	1,5		214	2,27	0,509	0,155	5,88	50
E	8,8	3,5	0,4313	60	0	0,7964		222	2,23	0,632	0,097	5,76	70
F	8,8	3,5	0,3999	60	0	1,5		239	2,08	0,414	0,049	5,39	60
G	8,8	3,5	0,4313	30	0	0,7964		209	2,31	0,865	0,096	5,96	50
H	8,8	3,5	0,3999	30	0	1,5		228	2,15	0,516	0,051	5,56	50
I	6,0	4,1	0,3999	60	0,5	1,5		140	1,148	0,257	0,133	2,97	70
L	6,0	4,1	0,3999	60	0	1,5		146	1,09	0,258	0,096	2,83	70
M	6,0	4,1	0,3999	30	0,5	1,5		128	1,21	0,339	0,135	3,13	50
N	6,0	4,1	0,3999	30	0	1,5		134	1,15	0,345	0,097	2,98	50
O	6,0	4,1	0,3999	60	0	0,7964		137,5	1,16	0,358	0,124	2,99	70
	8,8	3,5	0,3999	60	0	0,7964		220	2,23	0,525	0,097	5,77	70
	6,0	4,1	0,4313	60	0,5	0,7964		132	1,227	0,400	0,203	3,17	70
R	6,0	4,1	0,4313	30	0,5	0,7964		119	1,29	0,507	0,208	3,34	50
S	6,0	4,1	0,4313	60	0	0,7964		138	1,16	0,408	0,125	3,01	70
T	6,0	4,1	0,4313	30	0	0,7964		126	1,22	0,511	0,130	3,164	50

Figura A.1 – Resultados numéricos dos ensaios realizado por Colamussi *et al.*
Fonte: Colamussi *et al* (1974)

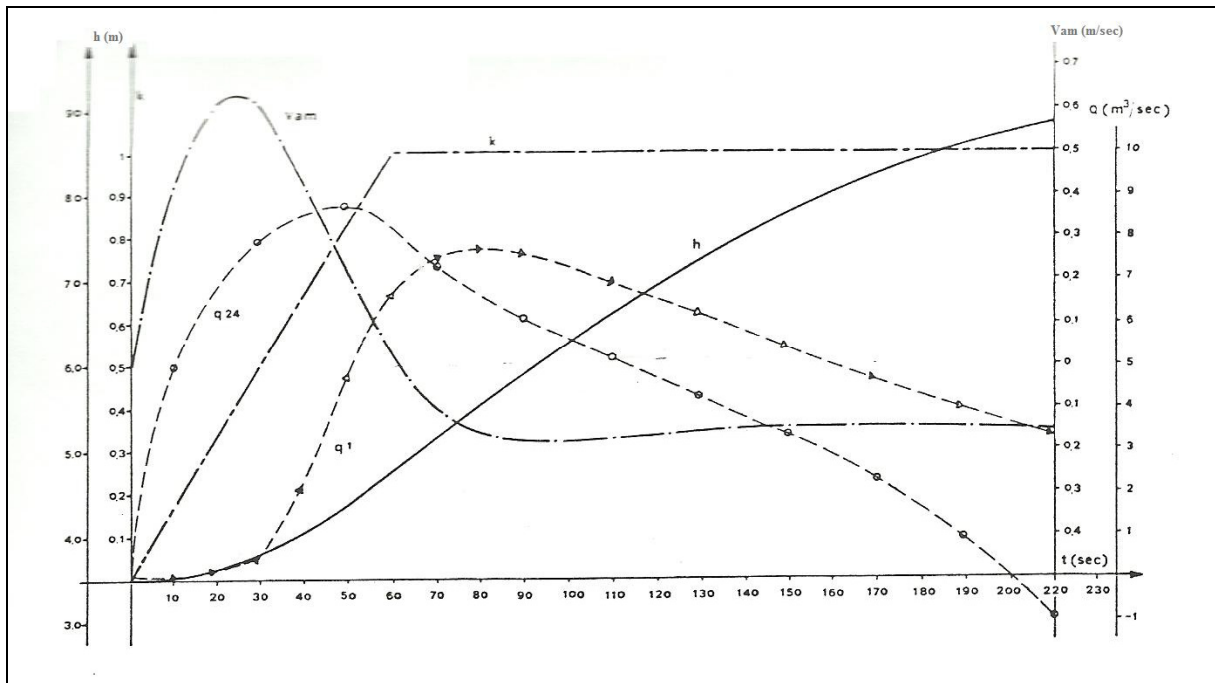


Figura A.2 – Resultados gráficos dos ensaios realizado por Colamussi *et al.*
Fonte: Colamussi *et al* (1974)

ANEXO 2

ANEXO 2 – MODELO FÍSICO

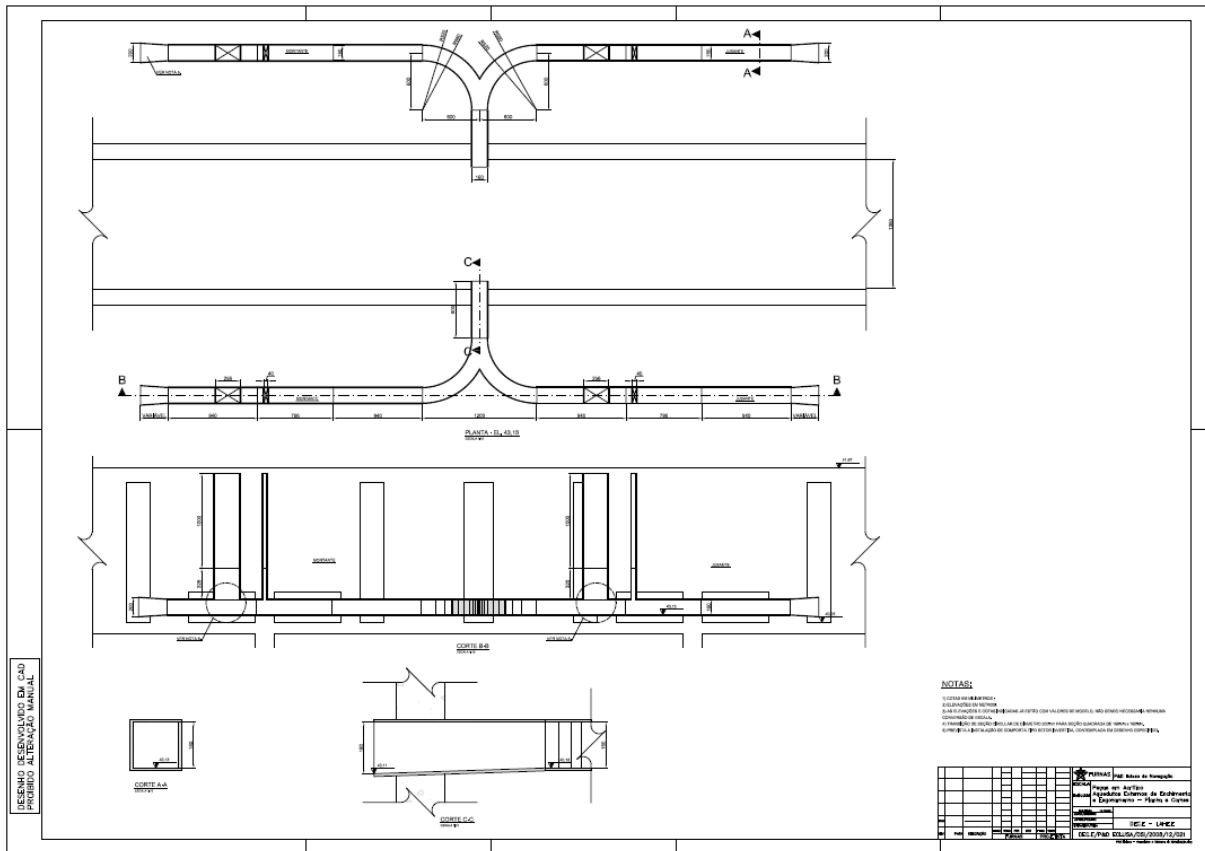


Figura A.3 – Características do modelo físico construído no LAHE
 Fonte: Furnas P&D (2010)

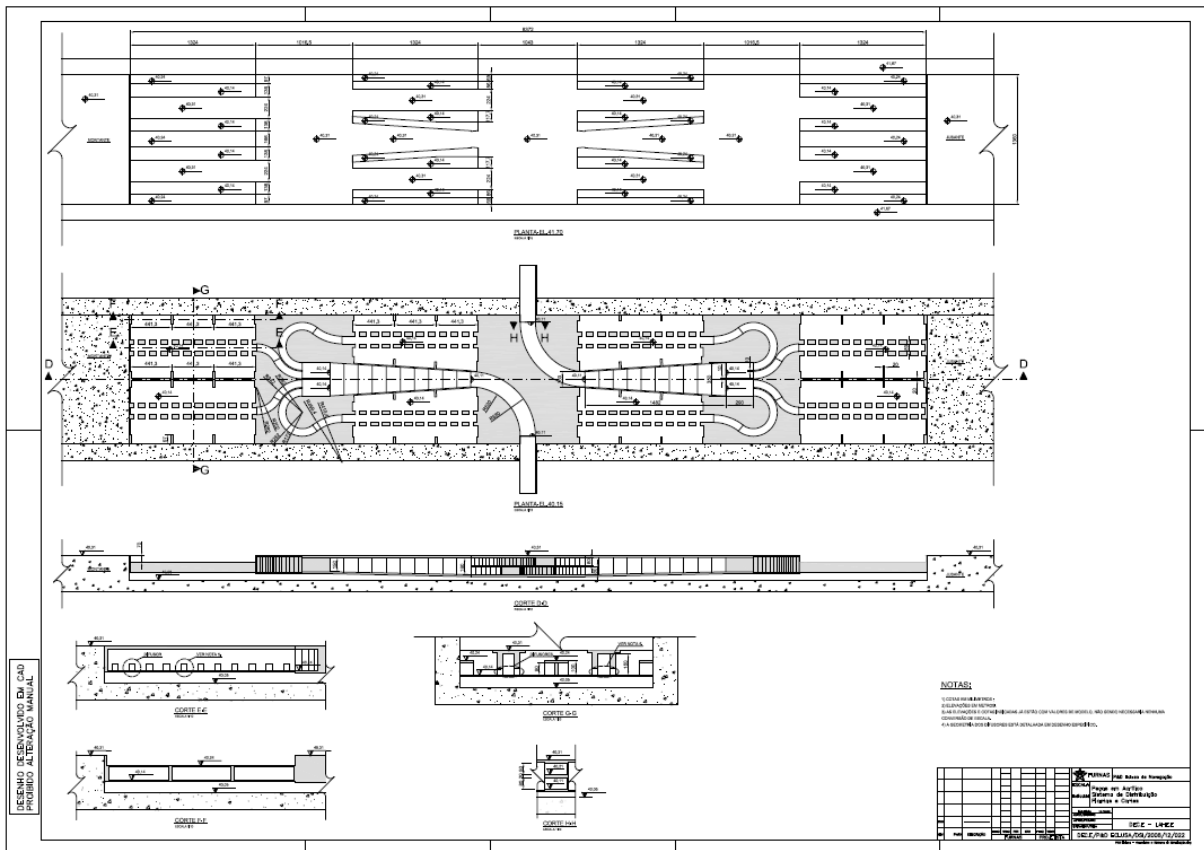


Figura A.4 – Planta do sistema de distribuição de água no modelo físico
 Fonte: Furnas P&D (2010)

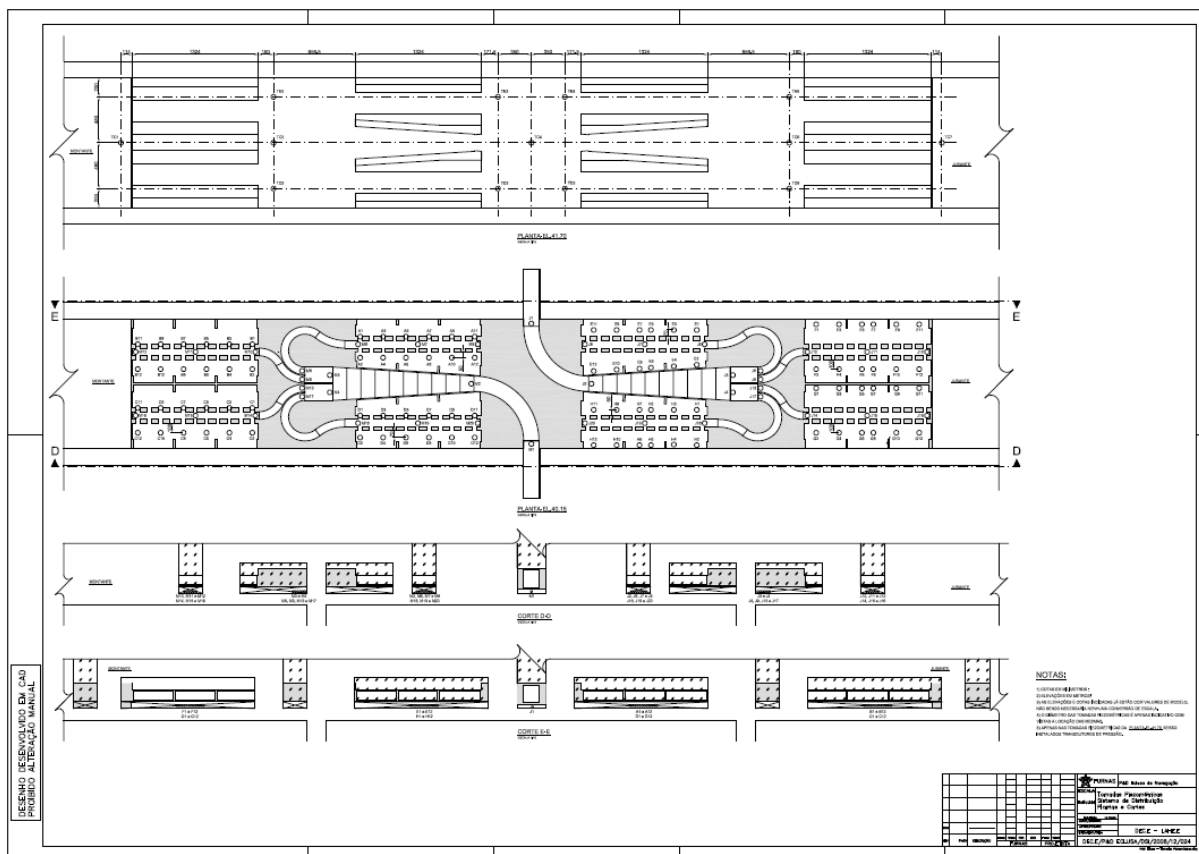


Figura A.5 – Planta das tomadas piezométricas no modelo físico
 Fonte: Furnas P&D (2010)

ANEXO 3

ANEXO 3 – RESULTADOS DO MÉTODO *CUTTING PLANE* PARA OTIMIZAÇÃO

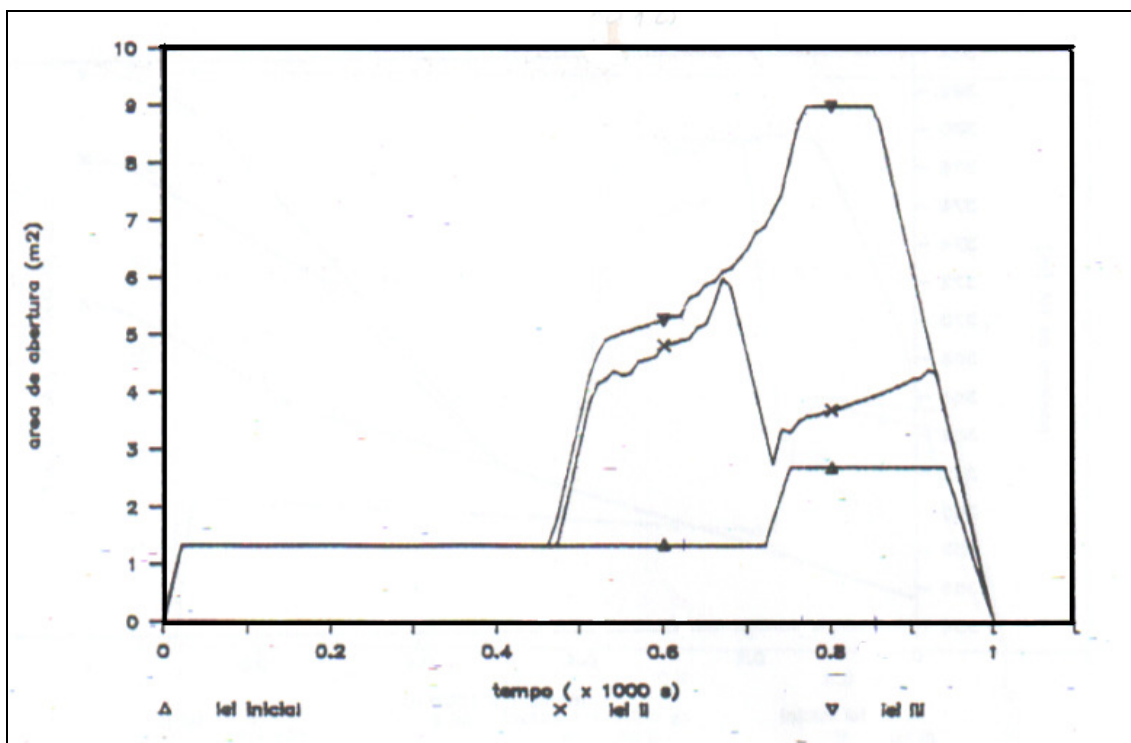


Figura A.6 – Seqüência de leis de manobra de abertura
Fonte: Palmier (1990)

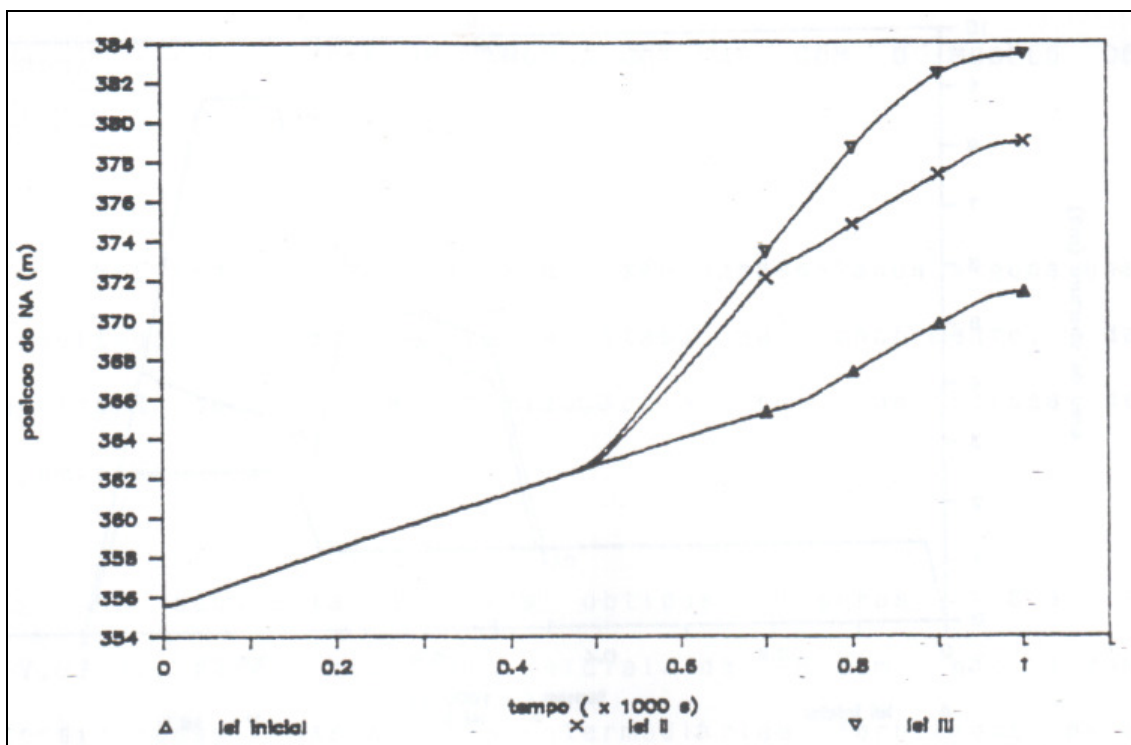


Figura A.7 – Posição do nível d'água na câmara da eclusa para seqüência de manobras
Fonte: Palmier (1990)

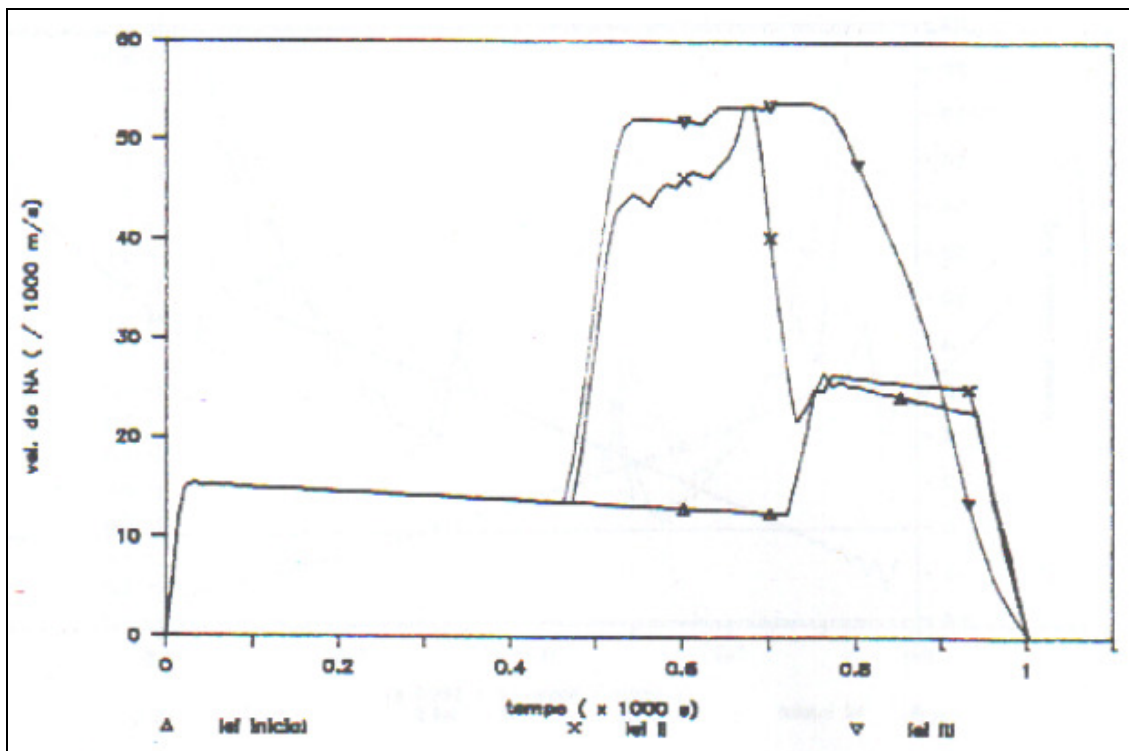


Figura A.8 – Velocidade do nível d'água para sequência de manobras
 Fonte: Palmier (1990)

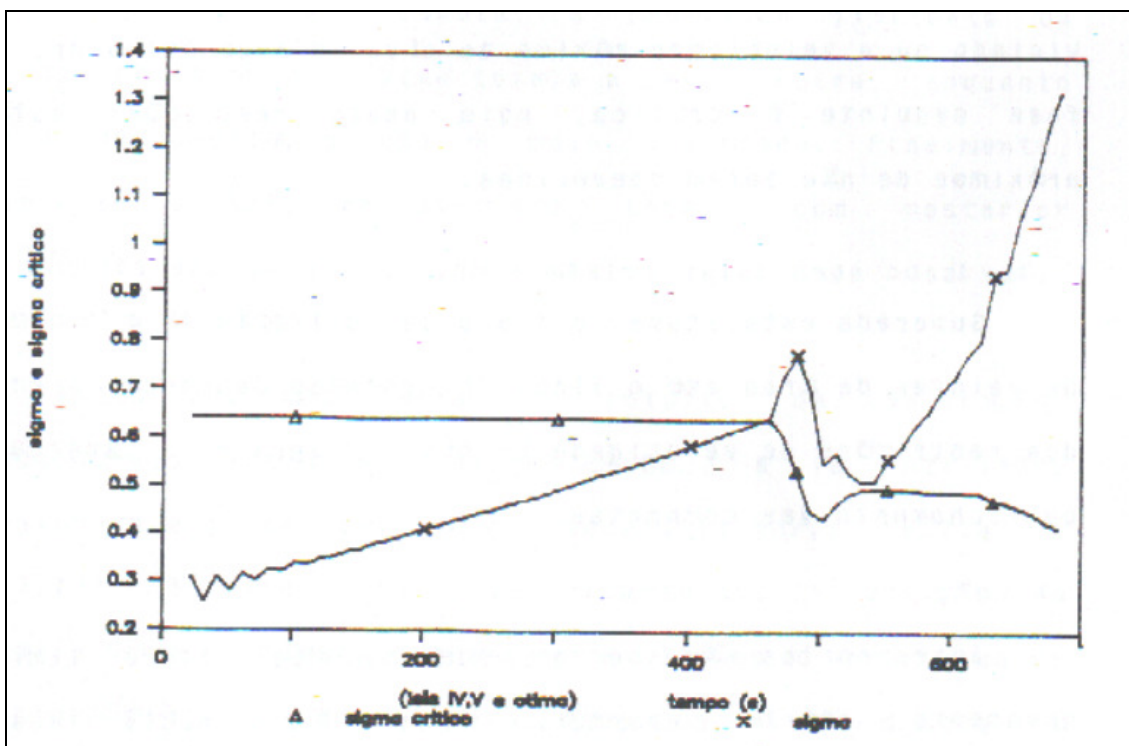


Figura A.9 – Índice de cavitação da manobra otimizada e índice de cavitação crítico
 Fonte: Palmier (1990)