Campus de São Carlos

EM DIREÇÃO À DETERMINAÇÃO DA CIRCULAÇÃO E
TRANSPORTE DE CONSTITUINTES NO RESERVATÓRIO
BILLINGS

DANIEL AUTRAN BOTELHO
ORIENTADOR: PROF. DR. HARRY EDMAR SCHULZ

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

**ESCOLA DE ENGENHARIA
DE SÃO CARLOS**

Serviço de Pós-Graduação EESC/USP

EXEMPLAR REVISADO

Data de entrada no Serviço: 16 / 02 / 01

Ass.:

**EM DIREÇÃO À DETERMINAÇÃO DA
CIRCULAÇÃO E TRANSPORTE DE
CONSTITUINTES NO RESERVATÓRIO
BILLINGS**

Daniel Autran Botelho

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciências da Engenharia Ambiental.

ORIENTADOR: Prof. Dr. Harry Edmar Schulz

DEDALUS - Acervo - EESC

31100017155

São Carlos

2000

Class.	TESE
Cutt.	0904
Tombo	T0067 01

st 1134366

B748d Botelho, Daniel Autran
Em direção à determinação da circulação e transporte de constituintes no reservatório Billings / Daniel Autran Botelho. -- São Carlos, 2000.

Dissertação (Mestrado) -- Escola de Engenharia de São Carlos-Universidade de São Paulo, 2000.
Área: Ciências da Engenharia Ambiental.
Orientador: Prof. Dr. Harry Edmar Schulz.

1. Recursos hídricos. 2. Modelos numéricos.
3. Reservatórios. 4. Represa Billings. I. Título.

*Ao meu
pai, meu maior incentivador*

AGRDECIMENTOS

Ao Mestre e amigo Harry Edmar Schulz, pela orientação, paciência e segurança passadas a mim com exímia habilidade.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, pela concessão da bolsa de estudo.

À Empresa Metropolitana de Águas e Energia, EMAE, pela cessão dos dados, especialmente ao Sr. Eduardo Rocha e ao Sr. Sebastião, da Seção de Meio Ambiente.

Ao caríssimo Professor Alejandro Borche Casalas, do Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, pela cessão do aplicativo e pela valorosa ajuda nesse trabalho.

À minha esposa, Flávia, pelo apoio nos momentos mais difíceis.

Aos familiares, incluindo Azur e Sig, pelo incentivo e paciência.

Por fim, aos amigos, em especial Celina, Vitor, Saci e Pinzón, todos os professores, com especial atenção voltada para a Professora Maria do Carmo Calijuri e funcionários do CRHEA/EESC/USP, sem os quais as discussões, brincadeiras e ajudas não transformar-se-iam neste trabalho

Lista de Figuras

Figura 3.1: Balanço de massa na seção longitudinal	10
Figura 3.2: Balanço de tensões na seção longitudinal.....	11
Figura 3.3: Resultados de correntes obtidos por SAGGIO, 1992.....	14
Figura 3.4: Sistema Sigma de coordenadas (MELLOR, 1998).....	22
Figura 3.5: Volume de controle utilizado no algoritmo SIMPLE.....	32
Figura 3.6: Resultados de YU et. alli para a baía de Hang-Zhou.....	37
Figura 4.1: Ilustração da Circulação de Langmuir (WETZEL, 1975)	40
Figura 4.2: Comportamento de seiches superficiais e internas (MÜNNICH, 1992).....	41
Figura 4.3: Correntes de densidade entrando no reservatório (WETZEL, 1975)	43
Figura 4.4: Dinâmica de saída d'água do reservatório, IMBERGER, 1979	44
Figura 4.5: Mecanismos de mistura no reservatório, IMBERGER, 1979	45
Figura 5.1: Sistema Hídrico da Eletropaulo (HIDROPLAN, 1995)	47
Figura 5.2: Localização do Reservatório Billings (HIDROPLAN, 1995).....	48
Figura 5.3: Uso e ocupação do solo na bacia de drenagem do reservatório Billings.	50
Figura 5.4: Alternativa de Abastecimento proposta na SABESP, 1997.....	51
Figura 6.1: Estado arbitrário de tensões num volume de controle qualquer.....	53
Figura 6.2: Balanço de massa na superfície	54
Figura 6.3: Balanço de massa no fundo.....	55
Figura 6.4: Balanço de tensões na superfície.....	55
Figura 6.5: Balanço de tensões no fundo	56
Figura 6.6: Localização das variáveis numa célula de cálculo.....	69
Figura 6.7: Esquema de interpolação QUICK.....	76
Figura 6.8: Contorno do reservatório adotado no modelo.....	80
Figura 6.9: Batimetria utilizada no modelo. Dados no quadro de valores em metros (m)	80
Figura 6.10: Gráfico da aproximação de vazões naturais.....	82

Figura 8.1: Níveis no reservatório na simulação com $Ch=1.0$ após 24 h. Valores representam o nível do reservatório em metros(m).....	91
Figura 8.2: Padrão de escoamento encontrado na simulação com $Ch=1.0$ após 24 horas.	92
Figura 8.3: Módulo das velocidades para a simulação com $Chézy = 1.0$ após 24 horas. Valores no quadro em metros por segundo (m/s).....	93
Figura 8.4: Níveis no reservatório na simulação com $v_t=50.0$ m2/s após 24 h. Valores no quadro representam o nível do reservatório em metros (m).....	93
Figura 8.5: Módulo das velocidades para a simulação com $C_w=3.5 \times 10^{-6}$ após 24 horas. Valores no quadro em metros por segundo (m/s).....	94
Figura 8.6: Módulo das velocidades para a simulação com $C_w=3.5 \times 10^{-4}$ após 24 horas. Valores no quadro em metros por segundo (m/s).....	94
Figura 8.7: Padrão de escoamento encontrado na simulação com $C_w=3.5 \times 10^{-6}$ após 24 hs.	95
Figura 8.8: Padrão de escoamento com escala 32 x menor que a Figura 8.7 para simulação com $C_w=3.5 \times 10^{-4}$	96
Figura 8.9: : Níveis no reservatório na simulação com $C_w = 3.5 \times 10^{-4}$, após 24 h. Valores no quadro representam o nível do reservatório em metros (m). A Figura evidencia o “empilhamento” d’água contra as paredes na direção do vento.....	97
Figura 8.10: Comparação de valores de níveis calculados e observados em agosto de 1994.....	98
Figura 8.11: Comparação de valores de níveis calculados e observados em março de 1995.....	98
Figura 8.12: Padrão de escoamento para simulação com vento na direção contrária SW com $C_w = 3.5 \times 10^{-6}$	99
Figura 8.13: Configuração da mancha no momento em que o pico de concentração passa pela saída do reservatório – 10 minutos do dia 11/02/95.....	100
Figura 8.14: Evolução das concentrações na saída do reservatório no período de outubro de 1994 a setembro de 1995	100
Figura 9.1: Reservatório com fluxos nas direções Taquacetuba – Summit-Control e Pequeno-Summit-Control na ausência de ventos e bombeamento em Pedreira.	103
Figura 9.2: Comparação dos valores calculados e observados durante o período estudado.....	104

Figura 9.3: Configuração da mancha pouco após o início do primeiro bombeamento em 25/10/1994. Valores no quadro correspondem às concentrações em unidades de concentração (u.c.)	109
Figura 9.4: Configuração da mancha cessado o Bombeamento em 27/10/1994. Valores no quadro correspondem às concentrações em unidades de concentração (u.c.)	109
Figura 9.5: Configuração da mancha após passado o mês de outubro de 1994 (1/11/94). Valores no quadro correspondem às concentrações em unidades de concentração (u.c.)	110
Figura 9.6: Configuração da macha no dia 26/11/1994. Observe as concentrações em na região de Diadema. Valores no quadro correspondem às concentrações em unidades de concentração (u.c.)	110
Figura 9.7: Configuração da mancha no dia 01/12/1994. Valores no quadro correspondem às concentrações em unidades de concentração (u.c.)	111
Figura 9.8: Configuração da mancha no dia 01/01/1995. Valores no quadro correspondem às concentrações em unidades de concentração (u.c.)	111
Figura 9.9: Configuração da mancha no dia 07/01/1995. Valores no quadro correspondem às concentrações em unidades de concentração (u.c.)	112
Figura 9.10: Configuração da mancha no dia 01/02/1995. Valores no quadro correspondem às concentrações em unidades de concentração (u.c.)	112
Figura 9.11: Configuração da mancha no dia 21/02/1995. Valores no quadro correspondem às concentrações em unidades de concentração (u.c.)	113
Figura 9.12: Configuração da mancha no dia 26/02/1995. Valores no quadro correspondem às concentrações em unidades de concentração (u.c.)	113
Figura 9.13: Configuração da mancha no dia 01/03/1995. Valores no quadro correspondem às concentrações em unidades de concentração (u.c.)	114
Figura 9.14: Configuração da mancha no dia 17/03/1995. Valores no quadro correspondem às concentrações em unidades de concentração (u.c.)	114
Figura 9.15: Configuração da mancha no dia 01/04/1995. Valores no quadro correspondem às concentrações em unidades de concentração (u.c.)	115
Figura 9.16: Configuração da mancha no dia 11/04/1995. Valores no quadro correspondem às concentrações em unidades de concentração (u.c.)	115
Figura 9.17: Configuração da mancha no dia 21/04/1995. Valores no quadro correspondem às concentrações em unidades de concentração (u.c.)	116
Figura 9.18: Configuração da mancha no dia 01/05/1995. Valores no quadro correspondem às concentrações em unidades de concentração (u.c.)	116

Figura 9.19: Configuração da mancha no dia 01/06/1995. Valores no quadro correspondem às concentrações em unidades de concentração (u.c.)	117
Figura 9.20: Configuração da mancha no dia 11/07/1995. Valores no quadro correspondem às concentrações em unidades de concentração (u.c.)	117
Figura 9.21: Configuração da mancha no dia 15/07/1995. Valores no quadro correspondem às concentrações em unidades de concentração (u.c.)	118
Figura 9.22: Configuração da mancha no dia 17/07/1995. Valores no quadro correspondem às concentrações em unidades de concentração (u.c.)	118
Figura 9.23: Configuração da mancha no dia 21/07/1995. Valores no quadro correspondem às concentrações em unidades de concentração (u.c.)	119
Figura 9.24: Configuração da mancha no dia 26/07/1995. Valores no quadro correspondem às concentrações em unidades de concentração (u.c.)	119
Figura 9.25: Configuração da mancha no dia 01/08/1995. Valores no quadro correspondem às concentrações em unidades de concentração (u.c.)	120
Figura 9.26: Configuração da mancha no dia 01/09/1995. Valores no quadro correspondem às concentrações em unidades de concentração (u.c.)	120
Figura 9.27: Configuração da mancha no dia 05/09/1995. Valores no quadro correspondem às concentrações em unidades de concentração (u.c.)	121
Figura 9.28: Configuração da mancha no dia 01/10/1995. Valores no quadro correspondem às concentrações em unidades de concentração (u.c.)	121

Lista de Tabelas

Tabela 3.1: Proporção dos diversos termos da equação da conservação de momentum, segundo GUNARATNAM & PERKINS (1970).....	12
Tabela 3.2: Características dos modelos de escoamento quanto aos tipos de considerações e dados de entrada. TUCCI (1993).....	13
Tabela 3.3: Constituintes considerados no modelo CE-QUAL-W2 (SAGGIO, 1992) ...	17
Tabela 3.4: Interação das variáveis nos processos internos no modelo CE-QUAL-W2 (SAGGIO, 1992).....	18
Tabela 0.5: Função $A(P)$ para diferentes esquemas numéricos (EIGER, 1989).....	34

LISTA DE SÍMBOLOS

- A – área da seção transversal, m^2
- $A_N^I, A_N^W, A_S^I, A_S^W, A_E^I, A_E^W, A_W^I, A_W^W$ – coeficiente de discretização da variável sobrescrita nos pontos adjacentes a P no método SIMPLE
- A_P^I, A_P^W – coeficiente de discretização da variável sobrescrita no ponto P no método SIMPLE
- A_x – coeficiente de viscosidade turbulenta na direção x, m^2/s
- B – largura do reservatório, m
- $B_P^{I,W}$ – termo constante no método SIMPLE
- c – concentração verticalmente integrada, Kg/m^2
- c' – desvio em relação à média de concentração na vertical, Kg/m^3
- $\bar{C}$ – concentração verticalmente e lateralmente integrada, Kg/m
- C_h – coeficiente de Chézy, $m^{1/2}/s$
- C_i – concentração de constituintes i, Kg/m^3
- C_w – Coeficiente de atrito do vento
- Di – condutância da difusão no escoamento, Kg/m^2
- Div – divergente do produto da profundidade pelas velocidades integradas na vertical
- D_h, D_T – coeficiente de dispersão longitudinal e transversal, m^2/s
- D_x, D_y, D_z – coeficientes de dispersão turbulenta, m^2/s
- f – parâmetro de Coriolis, s^{-1}
- Fi – taxa de escoamento, $Kg/m^2.s$
- F_x – termo de dispersão de *momentum* menos termos de aceleração convectiva no modelo hidrodinâmico lateralmente integrado
- F_x e F_y – termos que englobam difusão e viscosidade horizontal turbulenta no modelo POM.
- g – aceleração da gravidade, m/s^2
- H – média espacial de profundidade, m
- h – profundidade, m
- h^* – profundidade adimensionalizada
- H_{max} – profundidade máxima no número de Rosby, m

- H_{max} – profundidade máxima, m
 i, j – índices espaciais
 K – coeficiente de difusão molecular, m^2/s
 K' – coeficiente de advecção diferenciada, m^2/s
 L_{max} – largura máxima no número de Rosby, m
 $M_{i,j}, N_{i,j}, O_{i,j}, P_{i,j}$ – coeficientes da matriz de resolução numérica no modelo de transporte de constituintes
 n – índice temporal
 Ox, Oy, Oz – eixos cartesianos
 P – pressão, Kg/m^2
 p^* – pressão adimensionalizada no método das células
 P^*, V^*, W^* – estimativa inicial de pressão e velocidades no método SIMPLE
 P', V', W' – correção de pressão e velocidades no método SIMPLE
 Pe – número de Péclet
 Q – vazão, m^3/s
 ql – vazão por unidade de largura, $m^3/s.m$
 q_x, q_y, q_z – fluxos de massa, Kg/s
 $RMEAN$ – campo de densidades inicial, Kg/m^3
 R_o – número de Rosby
 S_0 – declividade de fundo
 S_f – termo de atrito ou declividade da linha de energia
 S_i – termo de fonte ou sumidouro
 t – tempo, s
 T – tensão efetiva, N/m^2
 t^* – tempo adimensionalizado no método das células
 $T, A_{i,j}, B_{i,j}, C_{i,j}, D_{i,j}, E_{i,j}$ – coeficientes da matriz de resolução numérica no modelo de circulação
 T_{xx}, T_{xy}, T_{yy} – tensão efetiva, N/m^2
 $\bar{u}, \bar{v}$ – velocidades nas direções x e y verticalmente integradas, m/s
 $\bar{u}, \bar{w}$ – velocidades nas direções x e z lateralmente integradas, m/s
 u^*, v^*, w^* – velocidades adimensionalizadas no método das células
 u', v' – desvios de velocidade em relação à média, m/s
 v_l – componente longitudinal da velocidade no escoamento lateral, m/s
 w – velocidade na vertical, m/s
 W_{10} – velocidade do ar a 10 m da superfície, m/s

- W_x, W_y – componentes da velocidade do vento, m/s
 x^*, y^*, z^* – coordenadas cartesianas adimensionalizadas no método das células
 x, y, z – coordenadas cartesianas, m
 α_1, α_2 – parâmetros dos termos de dissipação turbulenta no método das células
 Δt – incremento temporal, s
 ε – coeficiente de difusão turbulenta, m^2/s
 $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$ – coeficientes de difusão turbulenta, m^2/s
 Γ – coeficiente de difusão de uma variável qualquer, m^2/s
 η – nível d'água, m
 ϕ – ângulo da direção do vento com o eixo x
 ν_h – viscosidade horizontal turbulenta, m^2/s
 ν_t – coeficiente de dissipação turbulenta, m^2/s
 ν_v – viscosidade vertical turbulenta, m^2/s
 θ – ângulo entre velocidade e o eixo x e ângulo entre o plano do leito de fundo e o plano horizontal
 ρ – densidade, Kg/m^3
 ρ' – diferencial de densidade, Kg/m^3
 ρ_{ar} – densidade do ar, Kg/m^3
 σ – coordenada isopícnica, Kg/m^3
 σ' – coordenada isopícnica entre duas camadas $z's$, Kg/m^3
 τ_b – tensão de cisalhamento no fundo, N/m^2
 τ_{bx}, τ_{by} – tensão de cisalhamento no fundo, N/m^2
 τ_{bx^*}, τ_{by^*} – tensão de cisalhamento no fundo adimensionalizadas no método das células
 τ_{sx}, τ_{sy} – tensão de cisalhamento na superfície, N/m^2
 τ_η – tensão de cisalhamento na superfície, N/m^2
 $\tau_{x,y}^*$ – tensão de cisalhamento variável na coluna d'água nas direções x e y respectivamente adimensionalizada no método das células
 $\tau_{x,y}$ – tensão de cisalhamento variável na coluna d'água nas direções x e y respectivamente, N/m^2
 ω – velocidade angular da terra, s^{-1}
 ω – velocidade na vertical transformada, m/s
 ψ – latitude

RESUMO

BOTELHO, D. A. (2000). *Em direção à determinação da circulação e transporte de constituintes no reservatório Billings*. São Carlos, 1991, 140 p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

A adoção de Modelos Numéricos se constitui numa das principais ferramentas para tomadas de decisões quanto à utilização dos Recursos Hídricos. No presente trabalho, é feita uma revisão de modelos matemáticos empregados no estudo do escoamento superficial de corpos d'água, com atenção especial voltada aos reservatórios. Tendo em vista o reservatório Billings como um dos mais disputados recursos hídricos no país, para o estudo do seu comportamento hidrodinâmico e conseqüente transporte de massa, implementou-se o Modelo Bidimensional Verticalmente Integrado IPH-A, v. 116. Foi feita uma análise do escoamento de larga escala e suas prováveis conseqüências em relação ao estado de degradação da represa. O modelo numérico obteve resultados compatíveis com o observado na prática e poderá ser utilizado para posterior planejamento de campanhas com vistas a sua aferição, bem como servir de guia para implementação de modelos mais complexos e detalhados.

Palavras-chave: recursos hídricos, modelos numéricos, reservatórios, represa Billings.

ABSTRACT

BOTELHO, D. A. (2000). *Em direção à determinação da circulação e transporte de constituintes no reservatório Billings*. São Carlos, 1991, 140 p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

Numerical Modelling is one of the main tools for decision making concerning Water Resources uses. In this work, a review of the mathematical models used to study water-bodies surface flow is done with closer attention to reservoirs. Having the Billings reservoir in mind as one of the most disputed water resources in the whole country, the vertically-averaged two-dimensional model IPH-A v.116 was employed to its hydrodynamical and consequent mass transport study. A large scale flow analysis and its likely consequences related to reservoir's degradation state was done. The numerical model was in close agreement with field observations and can be used to further field measurements planning regarding its calibration, as well as a guide for more detailed and complex models implementation.

Keywords: water resources; numerical models; reservoirs; Billings reservoir.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	I
LISTA DE TABELAS.....	V
LISTA DE SÍMBOLOS.....	VI
RESUMO	IX
ABSTRACT	X
SUMÁRIO.....	XI
1 INTRODUÇÃO	1
2 OBJETIVOS	7
3 REVISÃO DE LITERATURA	8
3.1 MODELOS HIDRODINÂMICOS	8
3.1.1 Modelos Hidrodinâmicos Unidimensionais	9
3.1.2 Modelos Hidrodinâmicos Bidimensionais Lateralmente Integrados	13
3.1.3 Modelos Hidrodinâmicos Bidimensionais Verticalmente Integrados	18
3.1.4 Modelos Hidrodinâmicos Tridimensionais	21
3.2 O Transporte	26
3.3 Resolução Numérica	31
4 RESERVATÓRIOS: ALGUNS CONCEITOS DA SUA HIDRODINÂMICA	38
5 A REPRESA BILLINGS	46
6 MODELO NUMÉRICO BIDIMENSIONAL VERTICALMENTE INTEGRADO DO RESERVATÓRIO BILLINGS	52
6.1 MODELO MATEMÁTICO PARA SIMULAÇÃO DA HIDRODINÂMICA 52	
6.2 O MODELO MATEMÁTICO DO TRANSPORTE DE MASSA	64
6.3 MODELO NUMÉRICO PARA RESOLUÇÃO DAS EQUAÇÕES	67
6.4 O MODELO APLICADO AO RESERVATÓRIO BILLINGS.	79
7 TESTES DO MODELO DE CIRCULAÇÃO	85
8 RESULTADOS	87
9 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	101
10 CONCLUSÕES SOBRE AS SIMULAÇÕES	123
11 RECOMENDAÇÕES FUTURAS	125
12 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	127
APÊNDICE	131

1 INTRODUÇÃO

A produção maciça de energia elétrica, principalmente durante este século, é um dos responsáveis pelo aumento do desenvolvimento científico e tecnológico experimentado pela humanidade ao longo deste período. Porém, devido ao próprio contexto histórico relacionado com a necessidade de suprimento de energia para gerar esse desenvolvimento, esta produção iniciou-se à parte de uma consciência da necessidade de um desenvolvimento sustentável. Consequentemente foram deixadas seqüelas no meio ambiente para qualquer das diversas formas de produção de energia que podemos arrolar, seja através de usinas termelétricas, usinas nucleares ou usinas hidrelétricas. Com o decorrer do tempo, percebeu-se a necessidade de preservação do sistema (ou do meio-ambiente) como garantia da manutenção de condições apropriadas de vida, sem no entanto afetar os parâmetros de desenvolvimento atingidos pela sociedade em âmbito geral.

É uma visão unânime, dentro do contexto científico que vivemos, que a água é o elemento que propiciou a existência e evolução dos seres vivos. No que tange ao ser humano, o início e declínio de civilizações na história da humanidade estão muitas vezes ligados à proximidade dos corpos d'água. A disputa pela sua posse, apesar de ser um problema atual e de destaque, não é nenhum fato novo. A utilização dos recursos hídricos, alvo dos conflitos, foi se desenvolvendo ao longo dos tempos, passando do simples aproveitamento para pesca, lazer, abastecimento público e recepção de esgotos domésticos, para transporte, irrigação, abastecimento e recepção de resíduos industriais, refrigeração e, ressaltando, a geração de energia elétrica.

Grandes reservatórios passaram a ser construídos, os quais são utilizados não só para geração de energia, mas também para controle de cheias, abastecimento e navegação. No entanto, a sua presença tem gerado problemas, devido às alterações no sistema biológico,

atmosférico, hidrológico e social. Os principais problemas que ocorrem como modificação do sistema natural são um aceleradíssimo processo de eutrofização (já do lago construído), além do assoreamento dos leitos e erosão das encostas marginais dos reservatórios, problemas que apontam para a inviabilidade das atividades previstas para as represas, indo em direção contrária aos objetivos da construção das mesmas. Assim, vê-se que é necessário avaliar detalhadamente a viabilidade da profunda modificação causada no sistema natural com a construção de um reservatório, tendo em vista o pouco tempo de utilização previsto e o real aproveitamento dos recursos gerados com esta modificação.

Não se pode, contudo, permitir que tais processos indesejáveis adquiram “volume” e importância tais que venham a inviabilizar o aproveitamento dos recursos hídricos para a manutenção da qualidade de vida que artificialmente criamos. Muitos fatores podem ser mencionados para que mantenhamos o padrão de vida alcançado. Mas convém frisar que os recursos, quando mal utilizados, esgotam-se. Assim, as condições adequadas de uso de um reservatório passam pela manutenção das condições de qualidade de água neste reservatório. Ou seja, passa-se a falar dos ecossistemas vinculados às represas. Enfim, percebe-se que é de primordial importância a recuperação dos ecossistemas vinculados às represas, para permitir, entre outras coisas, um manejo mais estável das possibilidades de utilização dos recursos hídricos disponíveis (o declínio da qualidade da água implica em alterações no tratamento desta água para seus diferentes usos). Em outras palavras, o gerenciamento e monitoramento constantes devem, em princípio, permitir a manutenção prolongada da obra executada, pois conduzem ao controle dos níveis de qualidade e quantidade da água em seus diversos usos.

Para efetuar o gerenciamento mencionado deve-se entender e avaliar o comportamento dos reservatórios. Esse comportamento é influenciado pela hidrodinâmica e pela utilização, sendo que este último aspecto envolve também o uso do solo no entorno dos reservatórios. A hidrodinâmica representa o agente físico do próprio reservatório, enquanto que a utilização e o uso do solo nas adjacências representam os agentes químicos e biológicos. Os três aspectos não podem ser dissociados, pois se influenciam mutuamente. Um estudo objetivo, contudo, pode ser conduzido em etapas que enfatizem diferentes aspectos, mas que sejam sintetizadas posteriormente, interligando as respostas obtidas.

O estudo do comportamento hidrodinâmico define as distribuições de constituintes existentes no reservatório, os processos de troca de energia e massa, além da própria adequação do meio para a fixação de populações. Tal estudo pode ser feito por meio de

modelos físicos e matemáticos. Entre os últimos podem ser destacados os modelos numéricos. Modelos matemáticos estocásticos também têm sua aplicação em engenharia de recursos hídricos, mas são mais comuns nos estudos hidrológicos (modelos chuva-vazão, modelos de operação de reservatórios, etc.). RIGHETTO, 1998; TUCCI, 1993; YEVJEVICH, 1972 descrevem muitos destes modelos. O alto custo para o desenvolvimento de modelos físicos aplicados ao estudo da hidrodinâmica de reservatórios vem tornando cada vez mais atraente a utilização dos modelos numéricos. Não se trata de algo admirável ou espantoso, uma vez que se observa ainda um aprimoramento acelerado na área computacional, seja em capacidade de máquina, desenvolvimento de aplicativos ou capacitação de usuários. A velocidade e praticidade no manuseio das variáveis em estudo obtidas com o auxílio do computador vem permitindo bons ajustes e resultados de boa qualidade, seja em pesquisa ou na prática de gerenciamento.

Nos estudos limnológicos, além do comportamento hidrodinâmico, avalia-se o comportamento térmico, químico e biológico do corpo hídrico. A pesquisa nessa área vem procurando incorporar a utilização de modelos numéricos, devido à capacidade destes de reproduzirem as variações espaciais e temporais dos parâmetros em estudo, bem como a manipulação dos dados de entrada do sistema a fim de avaliar a importância de determinado parâmetro. A formação de equipes multidisciplinares para essa prática é imprescindível, de maneira a se identificar os objetivos de estudo, técnica ideal de amostragem de dados e simulações a serem desenvolvidas. Existem diversos modelos disponíveis, em constante desenvolvimento, de maneira a acompanhar o estado da arte do entendimento da dinâmica dos corpos d'água. Desta maneira, vários tipos de abordagem vêm sendo incorporados e utilizados.

Com esses diferentes tipos de abordagem, torna-se importante a escolha de um modelo conveniente a ser utilizado. Devem-se diferenciar dois aspectos: o primeiro refere-se ao desenvolvimento do modelo em si, que inclui o equacionamento das relações, métodos de resolução, comportamento das equações e verificação da lógica do modelo. O segundo vai em direção à aplicação do modelo, analisando a sensibilidade às variáveis, calibração e validação. Podemos então notar que, apesar da distinção dos dois aspectos, desenvolvimento e aplicação devem estar intimamente ligados (SAGGIO, 1992). Um não é possível sem o outro, mesmo sendo desenvolvidos e aplicados por pessoas ou equipes distintas. Muitos modelos já foram desenvolvidos para a aplicação em lagos e reservatórios, com grande diversidade de abordagens para representação dos fenômenos que ocorrem nesses meios

aquáticos. Assim, alguns usuários estão se restringindo à aplicação dos modelos, uma vez que o enorme tempo despendido no desenvolvimento, tanto na análise numérica como na programação, não representa ganho real na solução de problemas imediatos. Como a gama de modelos disponíveis é bem vasta, é relativamente fácil encontrar algum que possa ser aplicável ao estudo pretendido, de maneira que, quanto mais utilizado, mais 'confiável' este se torna, além de permitir um intercâmbio de informações mais direcionadas (EIGER, 1999).

FEDRA et al. e PATTEN apud SAGGIO op Cit.¹ alertam que apesar de todas as qualidades citadas na aplicação dos modelos, estes têm suas limitações e são apenas representações aproximadas do sistema real. Os modelos são sujeitos a incertezas tanto da representação do fenômeno, como no uso das medidas de campo dos parâmetros estudados, ou seja, "um modelo é uma hipótese sobre o sistema que ele representa, tanto pelo que é incluído como pelo que é excluído, e que o objetivo principal da modelagem não é produzir uma cópia exata do ecossistema, mas sim tentar reproduzir as características relevantes para o tratamento de uma determinada questão...". Tais características variam de acordo com a localização do objeto de estudo, inserindo-se aí a sua forma, condições climáticas, materiais no sedimento, etc. No caso dos lagos dos reservatórios, HENRY (1997) ² faz diversas inferências ao comportamento limnológico regional diferenciado para climas tropicais e temperados. BRANCO (1991) fazendo referência às condições climáticas no comportamento da evapotranspiração na região amazônica aponta problemas de qualidade de água nos lagos Brokopondo no Suriname e Curuá-Una no Brasil, devido ao enchimento dos mesmos, inundando vasta área de floresta tropical, acarretando sérias alterações químicas e biológicas. Assim, observam-se diferenças gritantes nos diferentes reservatórios e lagos estudados e deve-se aplicar com cautela um modelo gerado para descrever um tipo de problema quando se muda drasticamente de ambiente.

* * EIGER, S (1999). (USP, Escola Politécnica) *Comunicação Pessoal*.

¹ FEDRA, K. et alii. (1981). Uncertainty and arbitrariness in ecosystems modelling: a lake modelling example. *Ecological Modelling*, n.13, p. 87-110 apud SAGGIO, A. A. (1992). *Estudo da eutrofização do reservatório de Barra Bonita (Rio Tietê - SP) através de simulação Numérica*. São Carlos, 1992, 105 p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

PATTEN, B. C. (1976). Ecosystem modelling and reservoir management. *Ann. Okla. Acad. Sc.* N.5, p. 1-10. apud SAGGIO, A. A. (1992). *Estudo da eutrofização do reservatório de Barra Bonita (Rio Tietê - SP) através de simulação Numérica*. São Carlos, 1992, 105 p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

² HENRY, R. (1997) - *Limnologia Geral e Aplicada* - Curso oferecido no PPG - SEA - EESC/USP, 2º Semestre de 1997.

No Brasil intensificou-se ao longo das décadas a construção de reservatórios com objetivo principal de produção de energia elétrica e abastecimento de água. A construção de barragens para executar a produção constituiu-se num profundo alterador da paisagem inicial das regiões, culminando na criação de um novo ecossistema "artificial", que reuniu a capacidade de usos múltiplos das águas represadas, podendo-se destacar:

- Aproveitamento hidrelétrico
- Abastecimento de água
- Desejo de resíduos urbanos e industriais
- Recreação e pesca
- Navegação
- Controle de enchentes

TUNDISI (1981, 1988, 1989), frisa esta diversidade de tamanhos das represas no país, de reservatórios de pequeno a grande porte, além de sistemas compostos por reservatórios em cascata. Além do tamanho, atenção especial é dada às diferentes localizações desses corpos d'água, desde regiões metropolitanas a áreas despovoadas, bem como em áreas sujeitas à agricultura e pecuária. Tundisi relata ainda a importância social, econômica e ecológica dos diferentes reservatórios, enfatizando o manejo da bacia hidrográfica como um todo para o gerenciamento dessas águas.

Levando-se em conta o manejo de reservatórios em áreas metropolitanas, CALIJURI et. al. (1996) mencionam duas diferentes abordagens para solução dos problemas de qualidade de água encontrados: Tecnologia Ambiental fazendo uso de medidas de controle externo e Ecotecnologia fazendo uso de medidas de controle interno e/ou externo. Devido à complexidade, tanto das soluções como dos próprios problemas, esses autores recomendam a utilização de modelos de maneira a auxiliar na escolha das técnicas mais eficazes. Na sua discussão fica em aberto, contudo, quais modelos podem ser utilizados ou como os mesmos podem ser construídos de forma a responder as questões postas.

Seja na área dos estudos limnológicos, ou na tomada de decisões na gestão dos recursos hídricos, os modelos matemáticos (aplicados corretamente) mostram-se cada vez

mais relevantes e eficazes, apesar da ainda enorme dificuldade em representar os mecanismos de adaptação e evolução dos sistemas aquáticos. O que se pode afirmar é que a capacitação de pessoal técnico se faz necessária pelo número de reservatórios no país, muitos dos quais já enfrentam sérios problemas de qualidade de água e assoreamento de seus leitos. O presente trabalho se insere no contexto do estudo dos reservatórios do país, especificamente da Represa Billings, e aponta um caminho para uma primeira avaliação do comportamento hidrodinâmico dessas águas represadas.

2 OBJETIVOS

Este trabalho se insere num conjunto de estudos sobre o Reservatório Billings, que tem a finalidade de buscar um maior entendimento do seu comportamento hidrodinâmico, de maneira a subsidiar estudos posteriores na mesma linha de pesquisa, vinculados aos problemas de transporte de poluentes. Os objetivos principais deste trabalho podem ser assim arrolados:

1. Revisar o equacionamento dos principais modelos utilizados na determinação do escoamento em corpos d'água, de forma a permitir que os próximos trabalhos desta linha já tenham acesso a uma primeira informação dirigida à abordagem aqui seguida.
2. Revisar, especificamente, os conceitos relativos ao movimento das águas de reservatórios e suas implicações na mistura e transporte de constituintes. Neste sentido, pretende-se que os aspectos físicos sejam expressos claramente, de forma a embasar o estudo posterior.
3. Instalar e operar um programa bidimensional verticalmente integrado para determinação do comportamento hidrodinâmico em diferentes represas. Para cumprir este objetivo escolheu-se o programa IPH-A, que ficará disponível no Centro de Recursos Hídricos e Ecologia Aplicada (CRHEA), da Escola de Engenharia de São Carlos (EESC), USP.
4. Aplicar este modelo ao reservatório Billings, para determinação do seu escoamento sob diferentes condições de contorno do sistema. Neste sentido, o presente trabalho representa a primeira simulação com o reservatório de Billings completo.

3 REVISÃO DE LITERATURA

3.1 MODELOS HIDRODINÂMICOS

Modelos foram criados para fazer previsões. Porém, para obter resultados satisfatórios (previsões), é necessária uma análise detalhada do sistema a ser modelado, de modo que este seja quantificado adequadamente. Esta quantificação é invariavelmente acompanhada por uma “complicação” do modelo, tornando-o mais trabalhoso para ser utilizado (DAWDY, 1969). A intensidade da “complicação” que podemos admitir está vinculada, por sua vez, à capacidade de resolução das ferramentas que temos disponíveis.

No passado, muitos modelos levaram anos para serem desenvolvidos e milhares de horas de trabalho humano (FOLSE apud DAWDY op. cit.)[§]. Nos dias de hoje, o avanço da tecnologia computacional tem propiciado grande avanço na estrutura de modelagem, podendo-se incorporar cada vez mais variáveis relevantes, tornando mais precisa a capacidade de previsão e mais rápida a própria “construção dos modelos”. “A utilização de técnicas numéricas para resolução de modelos matemáticos é uma realidade crescente em todo o mundo, e com o avanço tecnológico dos computadores é possível e viável o desenvolvimento de métodos numéricos que gerem uma boa resolução para os modelos matemáticos” OLIVEIRA DE JESUS (1989).

[§] FOLSE, J. A. (1929). *A New Method of Estimating Stream Flow*. Washington. Carnegie Institution apud DAWDY, D. R. (1969). Mathematical Modeling in Hydrology. In: *The Progress of Hydrology - International Seminar for Hydrology Professors*, 1., 1969. *Proceedings*. Urbana, University of Illinois, v. 1, p.346-61.

3.1.1 Modelos Hidrodinâmicos Unidimensionais

Em qualquer estudo hidrodinâmico do escoamento superficial e de rios e canais devem ser adotadas simplificações, de modo a fazer uso das variáveis mais influentes no tratamento de uma determinada questão. Adicionalmente, este resultado deve ser satisfatório, ou seja, representar suficientemente bem a realidade observada. A aplicabilidade de um modelo pode também ser avaliada segundo as simplificações adotadas. Muitos pesquisadores procuram mostrar relações matemáticas de maneira a aceitar as simplificações impostas (neste sentido alguns autores, entre eles TUCCI, 1980, citam o trabalho de LIGHTHILL & WHITHAM, 1955). Entretanto, seguindo uma linha diferente, MAGALHÃES (1989) cita YEYJEVICH (1975), que diz: “A resposta (escolha do modelo) é, em geral, mais comandada pelo julgamento do profissional, do que por critérios matemáticos ou experimentais.” Muitas simplificações podem parecer drásticas, como o caso do uso de modelos unidimensionais. Esses esquemas unidimensionais se fundamentam na representação do escoamento baseados nas equações de Saint-Venant, que envolvem, como todos os equacionamentos na área de Mecânica dos Fluidos, os tradicionais princípios de conservação de massa e conservação de *momentum* (quantidade de movimento). Neste particular vale mencionar TUCCI (1993), que usa a classificação de CHOW (1959) para os modelos de escoamento identificando-os como hidrológicos ou hidráulicos, sendo que “... no primeiro grupo estão os modelos que consideram somente o efeito do armazenamento no escoamento (fato pelo qual estão sendo atualmente chamados de modelos de armazenamento e usam apenas a equação da continuidade), adaptando a formulação dos efeitos da equação da quantidade de movimento. Desta forma, segundo a definição do referido autor, os modelos que usam as equações de Saint-Venant” são classificados de modelos hidráulicos

Para o estabelecimento das equações de Saint-Venant mencionadas acima, as seguintes hipóteses são consideradas, bem explicadas em MAGALHÃES (1989):

- escoamento incompressível e fluido homogêneo;
- distribuição de pressão hidrostática na vertical;

- escoamento unidimensional, considerando que as velocidades transversais e verticais são pequenas se comparadas à longitudinal, e ainda assumindo que a velocidade é uniformemente distribuída na seção transversal.;
- trechos com variações graduais das seções transversais;
- aproximação na declividade do leito. Considerando θ o ângulo formado entre o plano horizontal e o plano do leito como pequeno torna-se aceitável a aproximação :

$$\text{sen } \theta \cong \text{tg } \theta = S_0$$

- declividade da linha de energia aproximada por uma formulação de escoamento permanente uniforme.

A seguir apresentamos o equacionamento de Saint-Venant:

A equação de conservação da massa, segundo o balanço de massa apresentado na Figura 3.1, é dada por:

Figura 3.1: Balanço de massa na seção longitudinal

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q_l \quad (3.1.1.1)$$

Q é a vazão, A , a área da seção transversal e q_l , a entrada ou saída de vazão por unidade de comprimento. A equação de conservação de *momentum* é obtida utilizando o esquema da Figura 3.2 e é geralmente apresentada da seguinte maneira:

Figura 3.2: Balanço de tensões na seção longitudinal

$$\frac{\partial V}{\partial t} + V \frac{\partial V}{\partial x} + g \frac{\partial \eta}{\partial x} + g S_f = g S_0 + \frac{q_l v_l}{A} \quad (3.1.1.2)$$

V é a velocidade na direção x , η representa o nível d'água, S_f é o termo de cisalhamento ou declividade da linha de energia; g é a aceleração da gravidade local; S_0 , a declividade de fundo; q_l , as entradas ou saídas de vazão por unidade de largura e v_l , a componente longitudinal da velocidade do escoamento lateral

Na eq.(3.1.1.2), o primeiro termo no primeiro membro representa a aceleração local, o segundo e o terceiro a inércia do movimento da água. Mais detalhadamente, o segundo formula a aceleração convectiva, o terceiro, a contribuição do perfil superficial (termo de pressão) e o quarto, a força de cisalhamento. O primeiro termo no segundo membro representa a força gravitacional e o último, uma eventual contribuição lateral da bacia hidrográfica. CHAUDHRY (1997)^{**}, em suas notas de aula, aproveita os trabalhos de GUNARATNAM & PERKINS (1970) in MAGALHÃES (1989) para quantificar os diversos termos da equação de Saint-Venant (os termos em Q e A são manipulados para obter relações em V (velocidade) e x) através de valores médios, de maneira a subsidiar as simplificações adotadas para os escoamentos em rios e canais. Fica claro que as forças influenciadas pelo campo gravitacional têm preponderância sobre os outros termos (tabela 3.1).

^{**} CHAUDHRY, F. (1997). *Recursos Hídricos – Aspectos Quantitativos*. /Curso ministrado no PPG-SHS, São Carlos, 1º Semestre/

Termo	Rios (m/s ²)	Escoamento Superficial(m/s ²)
$\frac{\partial V}{\partial t}$	0.9 (0.18%)	91.1 (2.69%)
$V \frac{\partial V}{\partial x}$	2.4-4.8 (0.49% – 0.61%)	91.1 (2.69%)
$g \frac{\partial y}{\partial x}$	9.1 (1.8%)	182.2 (5.38%)
gS_f	483.4 (100%)	3382.49 (100%)
gS_o	473.9 (98%)	3345.8 (98.9%)

Tabela 3.1: Proporção dos diversos termos da equação da conservação de *momentum* (GUNARATNAM & PERKINS, 1970)

Muitas simplificações podem ainda ser feitas sobre as equações apresentadas, adequando-se a casos particulares. PRANDLE (1974), despreza a contribuição lateral e a declividade de fundo na equação de *momentum*. Aplicações também podem ser encontradas em KING in. GRAY, PINDER & BREBBIA (1977) e BLAIN et. al. (1994). TUCCI (1980), apresenta uma formulação que adota canais retangulares e sem contribuição lateral.

TUCCI, (1980 e 1993) op. cit., e MAGALHÃES (1989) op. cit. ainda apresentam a simplificação para o modelo de onda de difusão, o qual despreza os termos de aceleração local, aceleração convectiva e contribuição lateral; e para o modelo de onda cinemática, que despreza mais a contribuição do perfil superficial (termo de pressão). Esse segundo modelo despreza os efeitos de jusante, de maneira que se restringe bastante a sua utilização, tornando-a proibitiva em rios e canais próximos a lagos, oceanos, estuários e pequenos afluentes de rios maiores. Os autores afirmam também que sua utilização ocorre quando o “...comportamento da onda cinemática (de movimento mais lento) é mais importante que as pequenas perturbações, que se comportam como uma onda dinâmica...”, e que o amortecimento da onda se dá devido ao armazenamento e não a efeitos dinâmicos. Menciona-se ainda que apesar da capacidade dos computadores atuais, estes modelos ainda permanecem em utilização. TUCCI, (1993) op. cit., apresenta a Tabela 3.2 na tentativa de resumir as características dos modelos de escoamento e tipos de dados de entrada:

Modelo	Distribuído	Efeito de jusante	Termos de pressão	Termos de inércia	Dados físicos
Armazenamento	Não	Não	Não	Não	Não
Onda Cinemática	Sim	Não	Não	Não	Opcional
Difusão	Sim	Sim	Sim	Não	Opcional
Hidrodinâmico	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim

Tabela 3.2: Características dos modelos de escoamento quanto aos tipos de considerações e dados de entrada. (TUCCI, 1993)

Quanto aos métodos de resolução dos modelos, uma solução analítica se restringe a muitas simplificações que desprezariam as variações espaciais e/ou temporais do corpo d'água em estudo. Soluções numéricas, então, ganharam bastante atenção para obtenção de resultados. Em contrapartida a manipulação desses métodos é mais trabalhosa, na sua organização de entrada e saída de dados. Destes métodos numéricos se destacam o das características e esquemas de diferenças finitas explícitos e implícitos, além de esquemas de elementos finitos (TUCCI, 1980; MASCARENHAS, 1989, CHAUDHRY, 1997)^{††}. O escoamento em reservatórios requer equacionamento das variáveis em pelo menos duas direções cartesianas.

3.1.2 Modelos Hidrodinâmicos Bidimensionais Lateralmente Integrados

Avançando para além da modelagem unidimensional anteriormente descrita, podemos dizer que a modelagem bidimensional do escoamento tem-se desenvolvido de forma bastante evidente, propiciando aplicações diversas, como a utilização no planejamento de obras hidráulicas e previsões tanto de dispersão de poluentes, como de qualidade de água, mostrando-se muitas vezes, ser um bom instrumento para o gerenciamento de reservatórios. Evidentemente, também são introduzidas simplificações no desenvolvimento desses modelos, de forma que se obtenham soluções para os problemas a serem tratados. Note-se

^{††} CHAUDHRY, F. (1997). *Recursos Hídricos – Aspectos Quantitativos*. /Curso ministrado no PPG-SHS, São Carlos, 1º Semestre/

que, em aumentando a dimensão espacial do problema aumenta-se potencialmente o número de operações e dados que se manipula em uma solução numérica. Assim, a solução obtida tem que ser viável seja em tempo de operação de máquina, seja em capacidade de armazenamento de dados. Na literatura consultada, modelos bidimensionais lateralmente integrados adotam simplificações para melhor compor a estratificação vertical e suas implicações no comportamento de qualidade da água em lagos e reservatórios. Um dos modelos mais “consagrados” com essa aproximação é o CE-QUAL-W2 (“Corps of Engineers, QUAL series model for 2-D Water-bodies”), que se mostra muito eficaz para aplicação em corpos d’água que tenham acentuados gradientes longitudinais e verticais de qualidade da água e pequenas variações na direção transversal. Sua aplicação foi muito difundida, com vasta literatura disponível, tendo muitos desdobramentos para diversas situações pretendidas. Parte da bibliografia é citada em J. E. EDINGER ASSOCIATION INC. (JEEAI, 1999)¹¹. Como exemplo, MARTIN (1988) e SAGGIO (1992) empregam este modelo para simulações de qualidade da água em lagos de reservatórios em região temperada e região tropical, respectivamente. A Figura 3.3 mostra um resultado obtido por SAGGIO (1992).

Figura 3.3: Resultados de correntes obtidos por SAGGIO, 1992, para o reservatório de Barra Bonita

Tal como nos modelos unidimensionais, a resolução das equações de Conservação de Massa e de Conservação da Quantidade de Movimento fornecem os valores das variáveis a se determinar, velocidade na direção longitudinal (“direção x”), velocidade na direção vertical (“direção z”) e nível d’água. O equacionamento acima mencionado no modelo CE-QUAL-W2 utiliza-se das seguintes relações (aqui já apresentadas em sua forma final simplificada):

¹¹ Disponível no “web-site”: <http://www.jeeai.com/>

$$\frac{\partial \bar{u}B}{\partial x} + \frac{\partial \bar{w}B}{\partial z} = qB \quad (3.1.2.3)$$

$$\rho \left(\frac{\partial \bar{u}B}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u}uB}{\partial x} + \frac{\partial \bar{w}uB}{\partial z} \right) = - \frac{\partial BP}{\partial x} + \rho \frac{\partial}{\partial x} \left(BA_x \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} \right) + \rho \frac{\partial}{\partial z} (B\tau_x) \quad (3.1.2.4)$$

$$\frac{\partial P}{\partial z} = \rho g \quad (3.1.2.5)$$

q é a contribuição lateral ao fluxo, ρ é a densidade em função da Temperatura e dos Sólidos Dissolvidos e Suspensos, B a largura média do reservatório variável em cada segmento, $\bar{u}$ e $\bar{w}$ as velocidades nas direções x e z respectivamente lateralmente integradas, A_x , o coeficiente de viscosidade turbulenta fazendo a aproximação da dispersão de *momentum* na horizontal e τ_x a tensão de cisalhamento variável na coluna d'água, esta dependente do vento e da turbulência. A partir destas equações acopladas obtém-se a equação da "superfície livre", utilizando as seguintes premissas:

- Integral na vertical da equação da continuidade (eq.(3.1.2.1)), formando a equação da superfície livre

$$\frac{\partial B_\eta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \int_\eta^h \bar{u}B dz - \int_\eta^h qB dz \quad (3.1.2.6)$$

sendo h a profundidade total e B_η a largura na superfície livre

- Aceleração do *momentum* horizontal da eq.(3.1.2.2) na forma de diferença avançada no tempo a ser empregado na integração do primeiro termo do lado direito da eq.(3.1.2.4)

$$\bar{u}'B' = \bar{u}B - \frac{\Delta t B}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + \Delta t B \frac{\partial \tau_x}{\partial z} + \Delta t Fx \quad (3.1.2.7)$$

sendo Δt o intervalo de tempo de uma iteração e

$$Fx = \frac{\partial}{\partial x} \left(BA_x \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} \right) - \frac{\partial \bar{u}uB}{\partial x} - \frac{\partial \bar{w}uB}{\partial z} \quad (3.1.2.8)$$

- Expansão e integração na vertical do gradiente horizontal de pressão

$$\frac{1}{\rho_\eta} \int_\eta^h B \frac{\partial P}{\partial x} dz = \frac{\partial \eta}{\partial x} g \int_\eta^h B dz + \frac{g}{\rho_\eta} \int_\eta^h \left(B \int_\eta^h \frac{\partial \rho}{\partial x} dz \right) dz \quad (3.1.2.9)$$

- Integração na vertical do termo das tensões de cisalhamento

$$\int_\eta^h B \frac{\partial \tau_x}{\partial z} dz = B_h \tau_h - B_\eta \tau_\eta - \int_\eta^h \tau_x \frac{\partial B}{\partial z} dz \quad (3.1.2.10)$$

sendo que os dois primeiros termos do lado direito representam as tensões de cisalhamento no fundo e na superfície, respectivamente, e o terceiro termo correspondem ao cisalhamento nas paredes laterais.

Obtém-se, então:

$$\begin{aligned} \frac{\partial B_\eta \eta}{\partial t} - g \Delta t \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial \eta}{\partial x} \int_\eta^h B dz \right) &= \frac{\partial}{\partial x} \int_\eta^h u B dz - g \frac{\Delta t}{\rho_\eta} \frac{\partial}{\partial x} \int_\eta^h \left(B \int_\eta^h \frac{\partial \rho}{\partial x} dz \right) dz + \\ &+ \Delta t \frac{\partial}{\partial x} \left(B_h \tau_h - B_\eta \tau_\eta - \int_\eta^h \tau_x \frac{\partial B}{\partial z} dz \right) + \Delta t \frac{\partial}{\partial x} \int_\eta^h F_x dz - \int_\eta^h q B dz \end{aligned} \quad (3.1.2.11)$$

sendo F_x determinado pelo termo de dispersão menos os termos da aceleração convectiva da equação de *momentum* na horizontal exposto na eq.(3.1.2.6), todos divididos por ρ . τ_h , τ_η e τ_x são as tensões de cisalhamento de fundo, tensão de cisalhamento na superfície e das paredes laterais respectivamente.

Une-se a estas equações aquela que representa o transporte de constituintes, que inclui as transformações biogeoquímicas, de maneira que o uso desta equação implicará, entre outras coisas, na determinação das variáveis responsáveis pela obtenção dos valores de densidade (equação de estado). De uma maneira geral, a equação de transporte de um constituinte i é expressa por:

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u} C_i B}{\partial x} + \frac{\partial \bar{w} C_i B}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(B D_x \frac{\partial C_i}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(B D_z \frac{\partial C_i}{\partial z} \right) + C_{qi} B + S_i B \quad (3.1.2.12)$$

sendo C_i a concentração do constituinte, D_x e D_z os coeficientes de dispersão turbulenta, C_{qi} as contribuições laterais e S_i os termos de fonte e sumidouro.

Resolve-se numericamente a equação de superfície livre (eq. (3.1.2.9)), com esquema regressivo no tempo e espacialmente implícito para os termos em η , com as outras variáveis do passo de tempo anterior, implicando num sistema tridiagonal para obtenção da altura da lamina de água em cada segmento. Com esquemas de diferenças finitas explícitos para as demais equações, parte-se para a resolução da equação de pressão (eq.(3.1.2.3)). Definem-se então, as velocidades longitudinais por meio da equação de transporte de *momentum* (eq.(3.1.2.2)) e as velocidades verticais pela equação da continuidade (eq.(3.1.2.1)). A próxima etapa é o cálculo das concentrações dos constituintes (eq.(3.1.2.10)), com respectivos aportes, fontes e sumidouros, completando-se a análise do tempo de estudo com a definição das densidades em função da temperatura e dos sólidos dissolvidos e suspensos. As tabelas 3.3 e 3.4 mostram, para ilustração, os constituintes que podem ser analisados com o uso do modelo CE-QUAL-W2 bem como as interações entre as variáveis adotadas no modelo.

Símbologia	Constituinte
(1) TRC	Traçador Conservativo
(2) SSI	Sólido Suspenso Inorgânico
(3) SDT	Sólido Dissolvido Total
(4) MODL	Matéria Orgânica Dissolvida Lábil
(5) MODR	Matéria Orgânica Dissolvida Refratária
(6) FITO	Fitoplankton
(7) DET	Detritos (Matéria Orgânica Particulada)
(8) PDI	Fósforo Dissolvido Inorgânico
(9) NH ₄ - N	Amônia
(10) NO ₃ - N	Nitrato e Nitrito
(11) C inorg.	Carbono Inorgânico
(12) OD	Oxigênio Dissolvido

Tabela 3.3 Constituintes considerados no modelo CE-QUAL-W2 (SAGGIO, 1992)

Este modelo parece representar mais fielmente o comportamento do corpo hídrico, devido à interação das equações hidrodinâmicas, de transporte de constituintes e de estado,

se compararmos à maioria dos modelos de transporte dos constituintes, onde as equações são resolvidas dissociadas, ou seja, primeiro são resolvidas as equações de transporte de quantidade de movimento e conservação da massa, para então caminharmos para a resolução da equação de transporte de constituintes.

Segundo ROSMAN (1989), a tendência atual é o direcionamento para os modelos tridimensionais quando as variações verticais tomam importância significativa no meio.

CONSTITUINTES	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)	(14)
(1) TRC	F	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
(2) SSI	-	Y	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	S	-
(3) S _{DT}	-	-	F	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
(4) MODL	-	-	-	F	D	-	-	D	D	-	D	-	-	-
(5) MODR	-	-	-	-	F	-	-	D	D	-	D	-	-	-
(6) FITO	-	-	-	M	-	Y	M	R	R	-	R	P	S	-
(7) DET	-	-	-	-	-	-	Y	D	D	-	D	-	S	-
(8) PDI	-	A	-	-	-	P.A	A	F	-	-	-	-	-	-
(9) NH ₄ -N	-	A	-	-	-	P.A	A	-	F	D	-	-	-	-
(10) NO ₃ -N	-	-	-	-	-	P	-	-	-	F	-	-	-	-
(11) C inorg	-	-	-	-	-	P	-	-	-	-	F	-	-	X
(12) OD	-	-	-	D	D	R	D	-	D	-	-	F	D	X
(13) Sedimento	-	-	-	-	-	-	-	D	D	-	D	-	-	-
(14) Superfície	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	X	X	-	-

NOTAÇÃO

D decaimento, decomposição e liberação	S afundamento
F difusão e advecção	A adsorção
M mortalidade	Y afundamento, difusão e advecção
P fotossíntese	X trocas na interface ar-água
R respiração	

Tabela 3.4: Interação das variáveis nos processos internos no modelo CE-QUAL-W2 (SAGGIO, 1992)

3.1.3 Modelos Hidrodinâmicos Bidimensionais Verticalmente Integrados

Outra simplificação comum no estudo de grandes áreas cobertas por água é o uso de modelos bidimensionais integrados verticalmente. Um modelo bidimensional integrado verticalmente pode ser aplicado a corpos d'água rasos desde que estes apresentem uma pequena variação vertical das suas propriedades físicas como no caso de alguns rios largos, lagos e reservatórios. OLIVEIRA DE JESUS (1985) aponta as seguintes características corpos d'água para aplicação do modelo:

- Grande relação entre largura e profundidade média
- Não ocorrência de estratificação
- Velocidades verticais irrelevantes e possibilidade de representação por valores médios para os parâmetros de escoamento que variam ao longo do eixo vertical. OLIVEIRA DE JESUS op. cit. e ROSMAN (1989)

Nos modelos aplicados na determinação de escoamentos integrados verticalmente, são evidentemente utilizadas novas simplificações das Equações de Conservação de Massa e das Equações da Conservação da Quantidade de Movimento ou de *momentum* (Equações de Navier-Stokes). Estas equações são resolvidas numericamente e podem ser aplicadas na forma de coordenadas retangulares (LEENDERTSE, 1971; PONCE & YABUSAKI, 1981; PRANDLE op. cit.; SALOMON apud OLIVEIRA DE JESUS op. cit.; CASALAS et. al., 1985; YU & RIGHETTO, 1996, entre muitos outros), ou também na forma de coordenadas esféricas (MUIN & SPAULDING, 1996) de acordo com a situação geométrica estudada. Os autores citados utilizaram para a discretização das equações métodos de diferenças finitas. GRAY, PINDER & BREBBIA, op. cit. e WANG, 1975 op. cit.; NISHIDA, 1995; YU et. al., 1998; apresentaram discretizações por esquemas de elementos finitos. Lembremos que, como as equações originais são expressas em forma contínua, as mesmas devem ser discretizadas, pois a resolução numérica exige que a região espacial seja definida a partir de uma malha (ortogonal ou não) onde cada variável é definida em pontos adequados (e não de forma contínua como originalmente expressas). Condições de contorno e condições iniciais fornecem as restrições que delimitam e direcionam a resolução do modelo. Podemos afirmar que os métodos numéricos transformam uma solução analítica para um número infinito de pontos em uma solução com um domínio bem definido com um número finito de pontos.

Para a simplificação dos modelos verticalmente integrados são adotadas várias hipóteses:

- acelerações verticais irrelevantes em comparação à aceleração da gravidade, o que acarreta uma distribuição de pressão hidrostática e cancelamento das componentes verticais da aceleração de Coriolis.
- velocidades verticais irrelevantes

- condições de contorno para volumes de controle na superfície e no leito definidos de acordo com as Figuras 6.2 a 6.5, através de balanço de massa e balanço de tensões, considerando o leito fixo e impermeável, evaporação e precipitação sem influência nos volumes de controle e tensões atuando na direção dos eixos cartesianos.
- pressão não varia ao longo da superfície.
- manipulações algébricas dos termos de convecção

Após estas simplificações, as equações na forma contínua assumem as formas:

Conservação de Massa

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial H \bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial H \bar{v}}{\partial y} = 0 \quad (3.1.3.13)$$

$\bar{u}$ e $\bar{v}$ são os vetores velocidade média (integradas verticalmente) nas direções x e y , respectivamente.

Conservação de *momentum*:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + f \bar{v} + g \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{1}{\rho H} (\tau_x - \tau_{bx}) \\ - \frac{1}{\rho H} \frac{\partial}{\partial x} (HT_x) - \frac{1}{\rho H} \frac{\partial}{\partial y} (HT_y) = 0 \end{aligned} \quad (3.1.3.14)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{v}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} - f \bar{u} + g \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{1}{\rho H} (\tau_y - \tau_{by}) \\ - \frac{1}{\rho H} \frac{\partial}{\partial y} (HT_y) - \frac{1}{\rho H} \frac{\partial}{\partial x} (HT_x) = 0 \end{aligned} \quad (3.1.3.15)$$

f é o parâmetro de Coriolis, ρ é a densidade do fluido, τ_x e τ_b são a tensão tangencial na superfície e a tensão tangencial no fundo, respectivamente e T é a tensão efetiva.

No primeiro membro, o primeiro termo das eqs.(3.1.3.2) e (3.1.3.3) representa a aceleração local do fluido na direção equacionada, o segundo e terceiro, a inércia convectiva (no caso da eq.(3.3.1.2), o segundo termo representa a inércia convectiva direta e o terceiro a inércia convectiva cruzada, segundo PONCE, 1980), o quarto, a aceleração de Coriolis, ou seja, a influência do movimento de rotação da terra no movimento do fluido, o quinto, o

termo de pressão, o sexto, o cisalhamento na superfície e no fundo e o sétimo e oitavo, representam a contribuição das outras tensões atuantes no fluido.

PONCE (1980) define tensão efetiva como o resultado das forças viscosas de cisalhamento, das forças devidas às correlações turbulentas de velocidade e da força gerada pelo processo de tomar a média das velocidades na vertical. As parcelas envolvendo a tensão efetiva configuram-se como a parte mais imprecisa na formulação já que elas pretendem incorporar num modelo integrado verticalmente, efeitos ligados à características tridimensionais do escoamento.

As simplificações para o esquema bidimensional verticalmente integrado conduz às formas apresentadas que são reapresentadas e discutidas oportunamente ao longo deste texto.

3.1.4 Modelos Hidrodinâmicos Tridimensionais

O desenvolvimento de modelos tridimensionais vêm ocupando lugar de destaque no estado da arte da hidrodinâmica computacional dos corpos d'água. Seu desenvolvimento originou-se a partir de meados da década de 70 com os modelos "multi-nivelados" ("multi-layered"). WANG, J. et. al. (1975), faz uma revisão dos primeiros trabalhos a utilizar o conceito destes modelos e faz um estudo simplificado da Baía de Massachussets. WANG, H. et. al. (1977) in. GRAY et. al. op. Cit. apresentaram um trabalho na mesma linha. A base conceitual para esses modelos está na representação do escoamento bidimensional verticalmente integrado em diferentes camadas. Esses autores enfatizam, na época, a falta de tratamento físico e numérico adequados às condições de contorno do sistema, restringindo muito a aplicação dos modelos propostos. Muitos dos sistemas investigados até aquele momento, bem como aquele apresentado pelos primeiros autores, utilizavam apenas duas camadas para o tratamento do problema. A carência de maquinaria capaz de tratar grande quantidade de dados também restringia a sua implementação, concordando com YU et. al. (1988) que alertam que a construção de tais modelos tinha por objetivo a redução da complexidade e a diminuição dos custos computacionais, porém buscando detalhar mais a característica do escoamento. Aliando o rápido desenvolvimento industrial ao grande interesse em assegurar a qualidade do meio ambiente em águas costeiras, esses últimos

autores ainda enfatizam a popularização de tais modelos, mesmo que sendo simplesmente transplantados da modelagem marítima e oceânica para modelagem de águas costeiras.

Outro avanço em relação à modelagem tridimensional do escoamento em corpos naturais está na utilização de um sistema " σ " de coordenadas. Primeiramente desenvolvidos para modelagem de grandes sistemas marítimos e oceânicos, esses sistemas eram empregados em situações nas quais o espaçamento da malha na horizontal fosse bem maior que a profundidade na direção vertical e a topografia de fundo fosse relativamente plana (YU et al., 1998). Discordando desta posição, MELLOR (1998) relata que o sistema " σ " de coordenadas aliado a um sub-modelo de turbulência, é um atributo necessário ao lidar-se com variação topográfica significativa, como no caso de estuários ou baías continentais. A coordenada " σ " é uma variável adimensional que representa a posição relativa da camada

em estudo em relação à profundidade total do local, através da relação $\sigma = \frac{z - \eta}{\eta + h}$. Desta forma σ varia de 0 na superfície livre a -1 na profundidade $-h$. A velocidade na vertical w é relacionada com a velocidade vertical transformada ω , que é a componente da velocidade normal às superfícies σ da seguinte maneira:

$$w = \omega + u \left(\sigma \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{\partial \eta}{\partial x} \right) + v \left(\sigma \frac{\partial H}{\partial y} + \frac{\partial \eta}{\partial y} \right) + \sigma \frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial \eta}{\partial t} \quad (3.1.4.16)$$

Figura 3.4: Sistema Sigma de coordenadas (MELLOR, 1998).

Dentre os modelos que adotam este princípio, o PRINCETON OCEAN MODEL (POM)^{§§} tem recebido especial atenção no ramo da oceanografia física de pequena, média e larga escala. Como esse modelo está disponível na "Internet", muitos usuários vêm aplicando-o e difundindo seus respectivos trabalhos na rede. O equacionamento utilizado pelo POM segue abaixo:

^{§§} Disponível no "web-site": <http://www.aos.princeton.edu/WWWPUBLIC/htdocs/pom/>

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial H \bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial H \bar{v}}{\partial y} + \frac{\partial \omega}{\partial \sigma} = 0 \quad (3.1.4.17)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial H \bar{u}}{\partial t} + \frac{\partial H \bar{u}^2}{\partial x} + \frac{\partial H \bar{u} \bar{v}}{\partial y} + \frac{\partial H \bar{u} \omega}{\partial \sigma} - f H \bar{v} + g H \frac{\partial \eta}{\partial x} + \\ \frac{g H^2}{\rho_0} \int_{\sigma}^{\sigma_0} \left[\frac{\partial \rho'}{\partial x} - \frac{\sigma'}{H} \frac{\partial H}{\partial x} \frac{\partial \rho'}{\partial \sigma'} \right] d\sigma' = \frac{\partial}{\partial \sigma} \left[\frac{K_m}{H} \frac{\partial \bar{u}}{\partial \sigma} \right] + F_x \end{aligned} \quad (3.1.4.18)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial H \bar{v}}{\partial t} + \frac{\partial H \bar{u} \bar{v}}{\partial x} + \frac{\partial H \bar{v}^2}{\partial y} + \frac{\partial H \bar{v} \omega}{\partial \sigma} + f H \bar{u} + g H \frac{\partial \eta}{\partial y} + \\ \frac{g H^2}{\rho_0} \int_{\sigma}^{\sigma_0} \left[\frac{\partial \rho'}{\partial y} - \frac{\sigma'}{H} \frac{\partial H}{\partial y} \frac{\partial \rho'}{\partial \sigma'} \right] d\sigma' = \frac{\partial}{\partial \sigma} \left[\frac{K_m}{H} \frac{\partial \bar{v}}{\partial \sigma} \right] + F_y \end{aligned} \quad (3.1.4.19)$$

$\rho' = \rho - RMEAN$, sendo que $RMEAN$ é o campo inicial de densidades, sendo proporcional a área média nas camadas z 's. σ' é a coordenada σ entre duas camadas z . K_m é a difusividade turbulenta vertical e F_x e F_y contém os termos de difusão e viscosidade horizontal turbulenta. Junto às eqs.(3.1.4.3-3.1.4.4), uma equação de fechamento de turbulência e de transportes de Temperatura e Salinidade são resolvidas, fornecendo os valores para o cálculo das densidades.

Na aplicação em águas costeiras, alguns pesquisadores têm “incrementado” o tratamento das condições de contorno de maneira a satisfazer melhor o processo de transporte das ondas internas nessas águas, além de diminuir os erros de truncamento. Mais detalhes do modelo e referências podem ser encontrados em MELLOR (1998) e O'CONNOR (1991). Entre outras aplicações, o POM vêm sendo utilizado para prever a hidrodinâmica dos Grandes Lagos americanos***.

Tratando-se dos modelos tridimensionais “tradicionais” (denominados assim por sua formulação ser descrita nas coordenadas cartesianas x, y, z) para águas rasas, podemos assumir uma pressão em equilíbrio hidrostático na vertical, ao nos referirmos à equação de conservação de *momentum* na direção referida. O método das células, descrito por MONTEIRO JR. (1988), foi aplicado ao reservatório do Lobo, com resultados congruentes, porém uma verificação para ajuste do modelo não foi desenvolvida. O ponto-chave desta aproximação consiste da adimensionalização das variáveis. Com este artifício, é obtido um gradiente vertical de pressão adimensionalizada nulo. A manipulação das equações de *momentum* na horizontal fornecem o equacionamento do campo de pressão a ser utilizado na determinação das velocidades horizontais. As velocidades verticais são calculadas através da

***MÜLLER, J. (1998). (USP. Instituto Oceanográfico). *Comunicação Pessoal*.

equação da continuidade. Primeiro, apresentamos as formas das equações de Navier Stokes empregada, considerando uma variação hidrostática de pressão.

Continuidade

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (3.1.4.20),$$

Momentum na direção x

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial u^2}{\partial x} + \frac{\partial uv}{\partial y} + \frac{\partial uw}{\partial z} - fv = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial z} \left(\nu_v \frac{\partial u}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\nu_h \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\nu_h \frac{\partial u}{\partial y} \right) \quad (3.1.4.21)$$

Momentum na direção y

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial uv}{\partial x} + \frac{\partial v^2}{\partial y} + \frac{\partial vw}{\partial z} + fu = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} \left(\nu_v \frac{\partial v}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\nu_h \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\nu_h \frac{\partial v}{\partial y} \right) \quad (3.1.4.22)$$

Pressão em equilíbrio hidrostático

$$-\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} - g = 0 \quad (3.1.4.23)$$

ν_v , ν_h correspondem, respectivamente, à viscosidade vertical e horizontal turbulenta.

Apresentamos, agora, as relações que levam à adimensionalização das variáveis, sendo que os asteriscos denotam as variáveis em sua forma adimensional:

$$x_* = \frac{x}{L}; y_* = \frac{y}{L}; z_* = \frac{z}{D}; t_* = ft \quad (3.1.4.24)$$

$$u_* = \frac{fL}{gD} u; v_* = \frac{fL}{gD} v; w_* = \frac{fL^2}{gD^2} w \quad (3.1.4.25)$$

$$h_* = \frac{h}{D}; p_* = \frac{p}{\rho g D} + \frac{z}{D} \quad (3.1.4.26)$$

$$\tau_{x*} = \frac{fL \tau_x}{\eta g}; \tau_{y*} = \frac{fL \tau_y}{\eta g}; \tau_{Bx*} = \frac{fL \tau_{Bx}}{\eta g}; \tau_{By*} = \frac{fL \tau_{By}}{\eta g} \quad (3.1.4.27)$$

equações (abolimos daqui em diante a utilização dos asteriscos para denotar que as variáveis são adimensionais)

Continuidade

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (3.1.4.13),$$

Momentum na direção x

$$\frac{\partial u}{\partial t} + R_0 \left[\frac{\partial u^2}{\partial x} + \frac{\partial uv}{\partial y} + \frac{\partial uw}{\partial z} \right] - fv = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial z} \left(\alpha_1 \frac{\partial u}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\alpha_2 \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\alpha_2 \frac{\partial u}{\partial y} \right) \quad (3.1.4.14)$$

Momentum na direção y

$$\frac{\partial v}{\partial t} + R_0 \left[\frac{\partial uv}{\partial x} + \frac{\partial v^2}{\partial y} + \frac{\partial vw}{\partial z} \right] + fu = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} \left(\alpha_1 \frac{\partial v}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\alpha_2 \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\alpha_2 \frac{\partial v}{\partial y} \right) \quad (3.1.4.15)$$

Pressão em equilíbrio hidrostático

$$\frac{\partial p}{\partial z} = 0 \quad (3.1.4.16)$$

p é a pressão adimensionalizada (perceba que as variações do campo de pressão são tomadas apenas nas direções horizontais), $R_0 = \frac{gH_{\max}}{f^2 L_{\max}^2}$ é o número de Rossby ($L_{\max}$ e $H_{\max}$ são a

largura máxima e a profundidade máxima respectivamente), $\alpha_1 = \frac{v_v}{fH^2}$ e $\alpha_2 = \frac{v_h}{fL^2}$ são os parâmetros dos termos de dissipação turbulenta vertical e horizontal respectivamente.

O campo de pressão é formulado por meio da integração vertical das equações de momentum em x e y (eq.3.1.4.14 e 3.1.4.15), seguida da soma das suas diferenciações em x e y , respectivamente, resultando na seguinte expressão do tipo Poisson ($\nabla^2 p = c$):

$$\begin{aligned}
& \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} + \frac{1}{h} \left(\frac{\partial h}{\partial x} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial h}{\partial y} \frac{\partial p}{\partial y} \right) = \\
& \frac{1}{h} \left\{ -\frac{\partial \text{Div}}{\partial t} + \alpha_2 \left(\frac{\partial^2 \text{Div}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \text{Div}}{\partial y^2} \right) + R_0 \left[\frac{\partial^2 \overline{hu^2}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \overline{hv^2}}{\partial y^2} + 2 \frac{\partial^2 \overline{huv}}{\partial x \partial y} \right] + \right. \\
& \left. \frac{\partial \overline{hv}}{\partial x} - \frac{\partial \overline{hu}}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} (\alpha_s \tau_x - \alpha_b \tau_{bx}) + \frac{\partial}{\partial y} (\alpha_s \tau_y - \alpha_b \tau_{by}) \right\}
\end{aligned}
\tag{3.1.4.17}$$

)

sendo $\text{Div} = \frac{\partial \overline{hu}}{\partial x} + \frac{\partial \overline{hv}}{\partial y}$ e a barra $\overline{\quad}$ sobre as velocidades significa que elas são

tomadas como médias na vertical.

3.2 O Transporte

O problema do transporte de um escalar (como a concentração de um poluente ou temperatura) em corpos de água naturais é um assunto de grande relevância tanto na gestão dos recursos hídricos como em situações de emergência, onde se deseja planejar rapidamente uma estratégia de combate a um acidente, como o derramamento de petróleo numa baía. A distribuição de constituintes é geralmente utilizada para representar a qualidade da água do corpo hídrico, sendo que cada substância pode ter um comportamento diferente. Em geral, considera-se a seguinte classificação, segundo EIGER (1991):

Constituintes conservativos: são aqueles cujo transporte e mistura não são afetados por reações com outros constituintes ou com o meio fluido envolvente, sendo distribuído exclusivamente pelos processos físicos de transporte. Traçadores são comumente encontrados nessa classificação.

Constituintes não conservativos: são aqueles cujo transporte e mistura são afetados por reações com outros constituintes ou com o meio fluido envolvente. Exemplos típicos são a Demanda Bioquímica de Oxigênio, Oxigênio Dissolvido, Nutrientes. Outros processos de transporte, além dos físicos, atuam em conjunto.

médio. Temperatura e o sal, por exemplo, são capazes de alterar a estrutura do campo de densidades e alterar o regime de escoamento do corpo hídrico em que estiverem presentes.

Constituintes passivos: são aqueles, ao contrário dos ativos, que não afetam as características hidrodinâmicas do escoamento. Demanda Bioquímica de Oxigênio exemplifica este tipo de constituinte.

Para expressar a distribuição espacial e temporal de um constituinte é utilizado o modelo de advecção-difusão turbulenta nas três direções cartesianas. Essa formulação pode ser dada por:

$$\begin{aligned} \frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} + v \frac{\partial C}{\partial y} + w \frac{\partial C}{\partial z} = & \frac{\partial}{\partial x} \left((K_x + \varepsilon_x) \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left((K_y + \varepsilon_y) \frac{\partial C}{\partial y} \right) \\ & + \frac{\partial}{\partial z} \left((K_z + \varepsilon_z) \frac{\partial C}{\partial z} \right) + S \end{aligned} \quad (3.2.1)$$

sendo C , a concentração média do escalar, u , v e w as velocidades turbulentas médias, K_i e ε_i são os coeficientes de difusão molecular e de difusão turbulenta e S , o termo

fonte ou sumidouro. O primeiro termo refere-se à variação da concentração ao longo do tempo. Os outros termos do lado esquerdo referem-se ao transporte advectivo do escalar (proporcionado pelo movimento da água) e os termos do lado direito incorporam o transporte difusivo molecular (Lei de Fick) e o transporte difusivo turbulento. Este segundo transporte difusivo tem magnitude bem maior que o primeiro, de maneira que é comum desprezar o efeito da difusão molecular. FISCHER (1979), enfatiza o emprego desta equação para quando encontrar-se uma situação em que a nuvem de um constituinte apresente um tamanho superior ao dos maiores urbilhões. Este autor procura caracterizar a mistura nos corpos d'água de acordo com a turbulência e a dispersão causada pelo escoamento de cisalhamento ("Shear flow dispersion"). Na obra é destacada a utilização de modelos estatísticos para descrever o transporte de uma substância.

O transporte de constituintes pode ser considerado bidimensional, tal qual o escoamento, e é representado pelas integrações laterais e verticais da eq.(3.2.1). A eq.(3.1.2.10), define o transporte integrado lateralmente. Essa aproximação é comum na cálculo do transporte de reservatórios, onde as variações verticais são de extrema importância no funcionamento do sistema. No caso de águas rasas (baías, lagos,

reservatórios, estuários, rios de largura considerável), comumente utiliza-se do equacionamento do transporte integrado verticalmente, que segue:

$$\frac{\partial cH}{\partial t} + \frac{\partial cHU}{\partial x} + \frac{\partial cHV}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(HD_x \frac{\partial c}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(HD_y \frac{\partial c}{\partial y} \right) + S \quad (3.2.2)$$

sendo c , a concentração média na vertical, H a profundidade, U e V as velocidade médias nas direções x e y respectivamente. D_x e D_y são os coeficientes de dispersão turbulenta integrados na vertical. Atualmente é comum a utilização do transporte de Turbulência, formando um processo iterativo no cálculo do campo de velocidades e transporte de constituintes. O cálculo do transporte da turbulência influencia nos valores do coeficiente de difusividade turbulenta nas equações de *momentum* (eqs.3.1.3.2 e 3.1.3.3). YU & RIGHETTO op. cit. (1996) apresentam um esquema de resolução numérica para o transporte verticalmente integrado de Turbulência, Temperaturas e Concentrações. No seu trabalho é dada ênfase a dois tipos de modelo de transporte de turbulência, o esquema $k-\epsilon$ e o esquema $k-\omega$. Ambos são caracterizados pelo estado local de turbulência. No primeiro os parâmetros são calculados de acordo com a energia cinética turbulenta k e a sua taxa de dissipação ϵ . No segundo, os parâmetros são calculados de acordo com a energia cinética turbulenta k e a intensidade de flutuação de vorticidade ω . Para introdução à base conceitual dos modelos $k-\epsilon$, e da própria turbulência, o leitor deve procurar o texto de EIGER (1989). Uma boa revisão também pode ser encontrada em SOUZA FILHO (1995). Todos autores citam os trabalhos de Rastogi & Rodi (1978), Patankar(1980) e Rodi (1980) como referências básicas para estudar esses modelos ou esquemas. Já no caso dos modelos $k-\omega$, o leitor deve procurar os diversos trabalhos de Yu e Ilgebusi, ambos referenciados no primeiro artigo citado no parágrafo. É interessante observar que a turbulência é transportada tal qual um escalar, levando-se em conta o devido tratamento dos termos “fontes ou sumidouro”. Segundo SOUZA FILHO (1995), “O transporte de turbulência, em essência, têm por objetivo quantificar a produção/dissipação, advecção e difusão da turbulência, determinando a sinergia espacial e temporal do processo turbulento;...”.

O escoamento considerado unidimensional também produz, por sua vez, um transporte de constituintes com advecção pronunciada na direção do escoamento. As equações passam a ser válidas a partir de um comprimento e tempo característicos, relativamente pequenos, de maneira que as concentrações tenham tempo de se uniformizar na seção ou coluna de água do corpo considerado. Por exemplo, IMBERGER (1994) e FISCHER(1979) op. cit. mostram uma aproximação comum no cálculo do transporte em rios

e estuários, dizendo ser válida a partir do tempo de lançamento maior que a relação $0,4H^2/\varepsilon$, sendo ε , o coeficiente de difusão turbulenta. Esse tempo do lançamento de uma partícula é o necessário para que as dimensões laterais da nuvem transportada sejam maiores que a distância necessária para ela se difundir pela seção toda do canal analisado. A proposição unidimensional segue:

$$\frac{\partial \bar{C}}{\partial t} + u \frac{\partial \bar{C}}{\partial x} = D_x \frac{\partial^2 \bar{C}}{\partial x^2} \quad (3.2.3)$$

sendo D_x o coeficiente de dispersão longitudinal.

Esse coeficiente de dispersão longitudinal é inversamente proporcional ao coeficiente de difusão da seguinte maneira:

$$D_x \approx \frac{\bar{u}^2 H^2}{\varepsilon_x} \quad (3.2.4).$$

Parece ser uma afirmativa dúbia descrever o coeficiente de dispersão longitudinal como inversamente proporcional ao coeficiente de difusão, já que eles ocupam o mesmo papel nas equações apresentadas, porém, deve-se levar em consideração, que a eq.(3.2.1) descreve o comportamento da concentração média da seção, sendo ele resultado dos efeitos da circulação interna do fluido e da difusão. Diminuindo o gradiente de concentração na seção transversal, temos a diminuição da difusão, tornando o efeito advectivo preponderante, de maneira que se constata um alongamento da nuvem transportada (IMBERGER, 1994 op. cit.). Os resultados experimentais de Elder em 1959 consideravam um escoamento num plano inclinado infinitamente largo e um perfil logarítmico de velocidades. O valor abaixo apresentados pela maioria dos autores que se referem ao coeficiente de dispersão longitudinal:

$$D_x = \frac{5.93 H U \sqrt{g}}{C_h} \quad (3.2.5),$$

sendo C_h o coeficiente de Chezy

Além da turbulência e constituintes, temperatura também pode ser tratada de maneira análoga. É interessante notar que, até agora, nos dirigimos apenas ao equacionamento do transporte. Outro ponto a ser investigado é o tipo de constituinte e suas características. Apresentar as equações simplesmente, não elege o modelo matemático

adequado, simplesmente nos mostra possíveis alternativas. O constituinte e seu comportamento frente as variáveis (temperatura, incidência luminosa, tempo de decaimento, etc.) juntamente com o tipo de corpo hídrico serão os indicadores da melhor aproximação. A determinação do campo de velocidades deverá obedecer à necessidade do modelo de transporte a ser utilizado. No caso de lagos estratificados, por exemplo, é muito comum a utilização de modelos de transporte longitudinais verticais. Nesses casos, as concentrações são comumente variáveis ao longo da coluna d'água, mostrando um perfil característico de distribuição. Esses perfis característicos devem ser obtidos com a modelagem matemática e numérica adequada. O transporte será sempre um produto do escoamento. A advecção é imposta pelo campo de velocidades e a difusão turbulenta de acordo com a própria turbulência, ambas propriedades do escoamento e não do fluido ou do constituinte. Os termos fonte e sumidouro é que tratarão e culminarão na obtenção de situações semelhante à realidade, pertinentes ao estado do fluido (temperatura, incidência luminosa, etc.) e características originais dos constituintes (decaimento, interação com outros constituintes, etc.).

Levando-se em conta o ajuste dos modelos, outros dois aspectos não podem deixar de ser considerados:

- A coleta adequada de dados, de maneira a serem encaixados e comparados nas simulações. RUTHERFORD (1994) designa um capítulo em sua publicação, para o planejamento e execução dos trabalhos de campo. Nessa obra, é deixado bem claro que o trabalho em equipe e sincronizado poderá produzir uma coleta adequada, caso contrário, raramente haverá resultados satisfatórios.
- A escolha do equipamento para amostragem dos dados, de maneira a obter dados confiáveis e no intervalo de tempo adequado (IMBERGER, 1994), deve ser muito bem feita, fato que pode ser limitado pela comum falta de recursos para muitos pesquisadores. Apesar desse detalhe, o mercado vem desenvolvendo aparelhos mais sofisticados, de manuseio mais fácil e de custo menor, ou pelo menos, de maneira a depreciar os valores de aparelhos mais velhos, porém não menos eficientes.

O desenvolvimento da equação do transporte de constituintes no plano horizontal será mais detalhado posteriormente na sua conceituação, simplificação considerada e no tratamento numérico dado para sua resolução, quando ao longo do texto for oportuno tratar deste assunto.

3.3 Resolução Numérica

Até aqui foram abordados os equacionamentos da hidrodinâmica e do transporte de constituintes em corpos d'água naturais. A complexidade inerente às equações diferenciais parciais que regem esses fenômenos tornam praticamente impossível a resolução dessas equações de maneira analítica, fazendo com que métodos numéricos sejam uma boa alternativa, além de barata do ponto de vista financeiro.

Dentre os métodos numéricos utilizados para resolução destas equações, esquemas baseados em diferenças finitas e elementos finitos têm sido comumente utilizados. A literatura sobre métodos numéricos é bem vasta e detalhes de sua base teórica podem ser encontrados nos trabalhos de NOYE, 1982, ROSENBERG, 1969, TUCCI, 1980, WANG, 1977, dentre muitos outros.

Os esquemas de diferenças finitas, em geral, são centrados, progressivos ou regressivos, ou ainda, uma combinação destes. Esquemas de interpolação quadrática como a série de esquemas QUICK também são encontrados. Esses esquemas foram empregados no modelo IPH-A utilizado neste trabalho e serão detalhados mais adiante. De acordo com o exposto nas seções anteriores desta dissertação, os modelos tridimensionais e, mesmo os bidimensionais, desde que não seja admitida a hipótese de pressão hidrostática (segundo EIGER, 1989, ocorre em escoamentos em que certos fenômenos dependem de uma distribuição diferente da hidrostática para as pressões, como no caso de recirculação gerada pela turbulência em canais) serão passíveis de resolução se conseguirmos determinar as pressões em cada célula de cálculo. Desta feita, parte-se para o cálculo das velocidades. Para a solução numérica do referido campo de pressões, a qual requer uma abordagem diferente da hidrostática, o método iterativo preditor-corretor SIMPLE ("Semi-Implicit Pressure-Linked Equation") tem tido predileção por parte dos pesquisadores (EIGER, 1989; SOUZA FILHO, 1995 e YU *et. al.* 1998). O desenvolvimento do método é atribuído a Patankar e Spalding em 1972 e tem como virtude uma maneira de incluir a pressão na equação da continuidade, de maneira a fazê-la tornar-se consistente com os princípios de conservação que sempre devem ser respeitados. SOUZA FILHO (1995) aponta os algoritmos da compressibilidade artificial e função potencial auxiliar como possíveis alternativas de se resolver as equações de Navier-Stokes.

Delincia-se aqui o algoritmo SIMPLE, da maneira explicitada por EIGER (1989). Primeiramente imaginemos que em um escoamento parabólico, isto é, um escoamento com uma direção principal e isento de recirculação nesse sentido, a difusão de qualquer propriedade transportada nessa direção é desprezível e o campo de pressões de jusante pouco influencia o campo de pressões de montante (SOUZA FILHO, 1995). A simplificação descrita em EIGER op. Cit. considera o escoamento como permanente. Para uma situação mais complexa, o leitor deve se dirigir ao trabalho de YU *et. al.*(1998), onde um escoamento sujeito a correntes de refluxo em qualquer direção é resolvido.

O método de discretização descrito por EIGER é chamado de método do volume de controle. Para assegurar os princípios de conservação de massa e de *momentum* no domínio todo, estabelecemos os próprios princípios em subregiões dentro do mesmo, de maneira que se esses princípios forem estabelecidos em todas essas subregiões chamadas de volumes de controle, o domínio todo então, terá assegurado essas leis de conservação. A Figura 3.5 ilustra o estabelecimento do volume de controle para as possíveis variáveis a calcular. Esse volume de controle requer o conhecimento das velocidades em suas faces (*n-north*, *s-south*, *e-east* e *w-west*), para uma melhor determinação dos fluxos das demais variáveis dependentes.. A utilização de uma malha alternada para discretização consegue retratar melhor esses fluxos de entrada e saída do volume de controle, pois as velocidades não são tomadas como interpolação de valores no centro de dois volumes de controle.

Figura 3.5: Volume de controle utilizado no algoritmo SIMPLE

Considerando que o transporte de uma variável é matematicamente descrito pelos termos de variação temporal, advecção, difusão e termos fonte, considerando regime permanente e utilizando os termos fonte para separar os termos de pressão, podemos escrever para qualquer esquema de discretização escolhido, a seguinte forma algébrica da equação de transporte (seja este de *momentum*, temperatura, massa, etc...).

$$A_p^U V_p = A_N^U V_N + A_S^U V_S + A_E^U V_E + A_W^U V_W + B_p^U - \Delta_z^U (P_p - P_s) \quad (3.3.4.1)$$

$$A_p^W W_p = A_N^W W_N + A_S^W W_S + A_E^W W_E + A_W^W W_W + B_p^W - \Delta_y^W (P_p - P_w) \quad (3.3.4.2)$$

Nas equações anteriores, os índices V e W significam que os coeficientes deverão ser calculados de acordo com a variável pretendida e os índices N , S , E , W e P de acordo com os respectivos volumes de controle. B_p representa os termos fonte e/ou sumidouro. Os coeficientes são definidos como:

$$A_p^{U_i} = A_E^{U_i} + A_W^{U_i} + A_N^{U_i} + A_S^{U_i} + (F_e - F_w) + (F_n - F_s),$$

$$A_E = D_e A(P_e) + [[-F_e, 0]], \quad A_W = D_w A(P_w) + [[F_w, 0]],$$

$$A_N = D_n A(P_n) + [[-F_n, 0]], \quad A_S = D_s A(P_s) + [[F_s, 0]],$$

$$D_e = \frac{\Gamma_e}{\Delta y}, \quad F_e = (\rho V)_e, \quad P_e = \frac{F_e}{D_e},$$

$$D_w = \frac{\Gamma_w}{\Delta y}, \quad F_w = (\rho V)_w, \quad P_w = \frac{F_w}{D_w},$$

$$D_n = \frac{\Gamma_n}{\Delta z}, \quad F_n = (\rho W)_n, \quad P_n = \frac{F_n}{D_n},$$

$$D_s = \frac{\Gamma_s}{\Delta z}, \quad F_s = (\rho W)_s, \quad P_s = \frac{F_s}{D_s}.$$

Aqui, D_i , representa a condutância de difusão do escoamento, sendo Γ_i o coeficiente de difusão da variável, F_i representa a taxa de escoamento e P_i representa o número de Péclet, uma relação entre a capacidade convectiva e difusiva da variável. $A(P_i)$ representa a função convecção-difusão variável para o tipo de esquema numérico utilizado, conforme a Tabela 3.5 abaixo e a relação $[[F_i, 0]]$ significa o maior dos valores listados entre os colchetes.

$$A_e^{w'} V_e' = \sum_{nb} A_{nb}^{w'} V_{nb}' + (P_P' - P_E') \Delta y' \quad (3.3.4.12)$$

$$A_w^{w'} V_w' = \sum_{nb} A_{nb}^{w'} V_{nb}' + (P_W' - P_P') \Delta y' \quad (3.3.4.13)$$

A correção de pressão ficou relacionada à correção de pressão dos pontos vizinhos que por sua vez estão relacionadas com as correções de pressões dos seus pontos vizinhos e assim por diante. A não linearidade dessas equações requer processos iterativos de cálculo, e no caso, necessitariam da resolução de matrizes muito grandes. Para economizar esforço computacional, elimina-se os termos de somatório das eqs.(3.1.4.27 a 3.1.4.30), que fazem a ligação de todos os pontos do domínio. O número de iterações para convergência aumenta, porém reduz-se o tempo de cálculo, não necessitando de uma resolução de matrizes tão esparsas. Esse artifício simplificador pode ser utilizado, tendo em vista que esses valores de correção devem ser nulos ao se chegar aos valores finais. A equação da continuidade para o escoamento em questão segue:

$$(U_P - U_{P_u}) \frac{\Delta y \Delta z}{\Delta x} + (V_n - V_s) \Delta z + (W_e - W_w) \Delta y = 0 \quad (3.3.4.14)$$

sendo U_P e U_{P_u} , as velocidades na direção x no ponto P e no ponto imediatamente a montante do ponto P .

As eqs.(3.1.4.27 a 3.1.4.30) sem os somatórios levam à seguinte equação:

$$A_P^{P'} P_P' = A_N^{P'} P_N' + A_S^{P'} P_S' + A_E^{P'} P_E' + A_W^{P'} P_W' + B_P^{P'} \quad (3.3.4.15)$$

Os coeficientes são, então, definidos:

$$A_N^{P'} = \frac{(\Delta z)^2}{A_N^{V'}} \quad (3.3.4.16)$$

$$A_S^{P'} = \frac{(\Delta z)^2}{A_S^{V'}} \quad (3.3.4.17)$$

$$A_E^{P'} = \frac{(\Delta y)^2}{A_E^{W'}} \quad (3.3.4.18)$$

$$A_W^{P'} = \frac{(\Delta y)^2}{A_W^{W'}} \quad (3.3.4.19)$$

$$B_P^{P'} = (U_{P_u} - U_P) \frac{\Delta y \Delta z}{\Delta x} + (V_n^* - V_s^*) \Delta z + (W_e^* - W_w^*) \Delta y \quad (3.3.4.20)$$

Resumindo o algoritmo SIMPLE, os passos a serem seguidos são:

- Estimativa do valor de P^* , ou valor obtido da iteração anterior
- Resolver as equações para U e qualquer outro escalar definido na mesma malha (eq.3.1.4.31).
- Resolver as equações de *momentum* nas direções y e z para obter V^* e W^* .(eq. 3.1.4.20 a 3.1.4.23)
- Fazer a correção do campo de pressões com a eq.(3.1.4.32)
- Obter as correções de velocidade com as eqs.(3.1.4.27 a 3.1.4.30)
- Com as eqs.(3.1.4.24 a 3.1.4.26), obter as novas estimativas de P , V e W .
- Utilizar algum critério de convergência para aceitar a solução. Caso ela seja rejeitada, utilizar essa nova estimativa de P como a estimativa inicial P^* .

Para conseguir assegurar melhor a convergência dos métodos iterativos, os métodos derivados SIMPLE-Consistent e SIMPLE-Revised foram desenvolvidos, utilizando os somatórios desprezados anteriormente. Os métodos iterativos, de uma maneira geral linearizam as equações. Desta maneira, dois processos iterativos se instalam durante o cálculo. O primeiro para resolução das equações linearizadas, que fornecerá os valores para as equações de correção não lineares inerentes ao algoritmo SIMPLE. Dentre os métodos não lineares, Eiger mostra uma predileção para os métodos de “dupla-varredura” similar ao ADI (“*alternate direction-implicit*”) e sub-relaxação (YU *et. alli*,1998) por serem mais convergentes, portanto permitindo uma solução mais rápida e confiável que métodos como *Newton-Raphson* e *Gauss-Seidel*.

Figura 3.6: Resultados de YU et. al. para a baía de Hang-Zhou

Muitas outras maneiras de se enfrentar os problemas de resolução das equações de movimento dos fluídos ainda podem ser mencionadas. As aqui apresentadas são apenas de caráter ilustrativo e necessitariam de um aprofundamento maior para sua implementação. De qualquer maneira, estabelecem um ponto de partida para um melhor estudo de sua utilização. Frisa-se que as pesquisas nesta área são intensas e que novos métodos com certeza serão desenvolvidos a partir de novos conceitos teóricos e avanços computacionais. Assim, uma revisão, ainda que não necessariamente profunda, sempre representará apenas o passo atual dos trabalhos e não esgotará as possíveis especulações lançadas pelos diferentes autores.

4 RESERVATÓRIOS: ALGUNS CONCEITOS DA SUA HIDRODINÂMICA

Reservatórios são corpos d'água com propriedades ímpares. O sistema fluvial, de razoáveis velocidades ao ser barrado forma outro ambiente com intensidade de movimentação muito menor, produzindo características peculiares na circulação das águas. Esta mesma característica de transição associada à capacidade de perturbação nas águas promovidas por ventos, também se confronta com os ciclos temporais de temperatura (sejam eles anuais ou diários) alimentados pela energia solar, culminando no aparecimento ou atenuamento de perfis verticais de densidade estabelecendo a estratificação do ambiente. A saída de água também influencia nessa dinâmica por meio de seu posicionamento em relação às camadas de densidade. Ora, esse fenômeno complexo é tema atual das pesquisas em limnologia física e seu entendimento está longe de um desfecho. De uma maneira geral, a movimentação dessas águas é promovida pelo conflito entre os fluxos de energia térmica, que proporcionam as forças de empuxo, e os fluxos de energia cinética promotores do transporte de *momentum* nas águas. Além desses aspectos, o cisalhamento com as paredes dos reservatórios, tal qual a passagem de água em qualquer canal, acarretará num escoamento de cisalhamento, muito importante na perda de energia cinética das correntes de entrada, auxiliando no processo de mistura da mesma. Nesta seção descreve-se resumidamente a hidrodinâmica dos reservatórios sem haver preocupação com a sua modelação matemática. Tenta-se separá-la de acordo com os fluxos de energia promovidos pela climatologia e correntes de entrada e saída do reservatório.

De acordo com Imberger (1994), define-se uma camada superficial como sendo o local a partir da superfície livre onde as ondas formam e quebram, até uma profundidade na qual a influência do vento e os fluxos de calor superficiais cessam (águas turvas são capazes de limitar a influência solar no lago). Sendo assim, bem próximo à superfície há uma camada

de cisalhamento, formada pela turbulência do vento, que é exportada para as águas mais profundas através da difusão turbulenta, pelo quebrar das ondas produzindo jatos verticais e por movimentos associados como circulação de Langmuir e circulação convectiva de penetração. Essa dinâmica é a mais fácil de ser observada, pois se dá na própria superfície do lago. Abaixo dessa camada de transmissão, forma-se um gradiente acentuado de temperatura chamado de termoclina, característica da região conhecida por metalimnio. Essa apresenta velocidades de cisalhamento com associada produção de turbulência decorrente destas. A ação do vento, propiciando um movimento turbulento, compete com a entrada de energia solar podendo, de acordo com o padrão estabelecido, formar diferentes estados de mistura nas diversas regiões da represa, de acordo com o aprofundamento ou levantamento do nível dessa camada de transição. Já a camada abaixo, chamada de hipolimnio, necessitará da movimentação da termoclina e das correntes de entrada e saída de água para desenvolver um padrão de agitação superior.

O vento proporciona a movimentação das ondas superficiais num movimento circular das águas transportado horizontalmente. O processo funciona como o deslocamento de um ponto no aro da roda de uma bicicleta, enquanto o cubo da roda da bicicleta representa a superfície livre média. Essa movimentação circular é rapidamente atenuada verticalmente. A relação entre o comprimento λ e amplitude h dessas ondas, chamadas *ondas de gravidade*, levam a duas observações (Wetzel, 1975). Primeiro, se a razão $h:\lambda$ atingir uma magnitude de 1:10 as ondas se quebram formando uma “espuma” característica, os jatos a que nos referimos no parágrafo anterior. Segundo, se a razão entre a profundidade da água e λ atinge a ordem de 1:20, tem-se as chamadas ondas de águas rasas ou ondas longas, que fazem o movimento circular acima referido transformar-se num movimento de “vai e vem”. Uma razão menor que essa culmina nas chamadas ondas de águas profundas ou ondas curtas. A transição desta segunda onda para a primeira culmina na redução dos próprios comprimento e amplitude da onda. Forma-se então, um “quebrador” de ondas, que dependendo da profundidade local pode ser submerso ou não (“plunging” ou “spilling breaker”, respectivamente). No primeiro caso, o quebrar da onda não consegue completar um vórtex e culmina na ressuspensão de sedimentos da zona litorânea do lago.

Em algumas circunstâncias, quando os ventos ultrapassam a velocidade de 3 m/s, a pressão de circulação das ondas gera uma instabilidade que é dispersada para baixo, iniciando um padrão de convecção. Esta é a chamada circulação de Langmuir, promovendo movimentos helicoidais na direção do vento. Formam-se zonas de convergência e

divergência, sendo que nestas aparecem faixas de material particulado tais como algas e zooplankton, paralelas à essa mesma direção (ver Figura 4.1 ilustrativa abaixo). Este é um dos processos primários de conversão de energia do vento em energia de ondas superficiais de maneira a produzir turbulência e mistura na camada superficial.

Figura 4.1: Ilustração da Circulação de Langmuir (WETZEL, 1975), representando os movimentos helicoidais superficiais. Entre duas linhas de divergência, podemos encontrar agregados de matéria orgânica.

A transmissão de energia promovida pela turbulência no epilimnio e pelas correntes de Langmuir geralmente é bastante atenuada pela barreira estável da região metalimnética. Porém, se o vento continuar agindo com forte intensidade, a massa de água se "empilhará" na margem em que o vento está direcionado, de maneira que a força gravitacional empurrará o metalimnio, aprofundando-o nessa fronteira. Uma recirculação vertical é gerada nesse local promovendo um aumento da profundidade do epilimnio nessa região. É como se houvesse uma erosão das camadas inferiores devido à ação do vento, podendo culminar num gradiente horizontal de temperatura. Essa análise é bastante simplificada, pois o formato do lago (topografia) e as condições climáticas são de fundamental importância no padrão a ser desenvolvido. Correntes de sentido oposto se formam na camada mais profunda de forma a compensar o movimento do epilimnio. Como essa camada é menor que o epilimnio, as águas não conseguem desenvolver um padrão turbulento semelhante ao do mesmo. Um movimento desses gera *seiches* internas no metalimnio, que compõe um dos principais movimentos das regiões internas ao lago. Devemos lembrar que situações dessas se instalam quando são

severas as condições de vento que se apresentam. Em caso de tempestades terão influência marcante na troca de nutrientes entre as camadas do lago.

Ao cessar a ação do vento, é comum o estabelecimento de ondas estacionárias, comumente chamadas de *seiches* superficiais. Wetzel (1975) define tais ondas como oscilações da superfície livre formada após uma perturbação. São ondas de comprimento de ordem de grandeza das dimensões da bacia lacustre que formam movimentos de “vai e vêm”, chamados *modos*. Esses *modos* vão sendo atenuados e seu período bem como sua amplitude diminuem mais que a metade conforme eles vão se estabelecendo, ou seja, o segundo *modo* durará aproximadamente duas vezes menos que o primeiro e assim por diante. No caso das *seiches* internas, sua amplitude é bem maior que a das *seiches* de superfície e serão capazes de gerar ondas internas na camada abaixo mais estável, as quais se quebrarão nos contornos do lago, podendo causar um aumento da capacidade de mistura hipolimnética. Um esquema da formação das *seiches* internas e externas é mostrado na Figura 4.2.

Figura 4.2: Comportamento de *seiches* superficiais, menos duradouras, e internas que perduram por um período mais longo. (MÜNNICH et alli., 1992. – Observations of the second vertical mode of the internal seiche in an alpine lake. *Limnology and Oceanography*. v.37, n.8, p. 1705-1719)

Quanto aos movimentos de entrada e saída de água no reservatório, devemos analisar dois aspectos fundamentais, o fluxo boiante e a energia cinética turbulenta. No caso da entrada de água, o fluxo boiante é estimado em relação à diferença de densidade (nos lagos em geral, provocada pela temperatura) da água do rio no lago e a energia cinética, quanto à velocidade de entrada dessa massa de água. Numa análise muito simplista apontada na Figura 4.3, podemos dizer que encontraremos três situações para essas correntes de densidades de entrada: o *overflow*, o *interflow* e o *underflow*. O primeiro caso ocorre quando a densidade da água que entra no lago for menor que a do mesmo. Desta feita, a mistura das águas ocorre no epilimnio quando se der a dissipação de grande parte da energia turbulenta disponível na corrente. O segundo e terceiro casos ocorrem se a densidade da água entrante for maior que a do corpo receptor fazendo com que esta se dirija ao hipolimnio. No caso da segunda abordagem, se o fluxo boiante (devido ao pequeno gradiente de densidades hipolimnético) for capaz de dissipar a energia cinética antes da saída de água do reservatório, uma intrusão ocorrerá num estrato intermediário para posterior mistura. Se esse fluxo for incapaz de dissipar a energia, uma corrente de densidade acompanhará o fundo do lago em toda a sua extensão para depois misturar-se completa ou parcialmente com o corpo d'água principal, dependendo das condições de saída de água do lago, caracterizando o terceiro tipo citado. Esses escoamentos estão sujeitos ao atrito cisalhamento com o fundo da represa, propiciando uma dispersão mais acentuada resultante do escoamento de cisalhamento, que rouba parte do *momentum* turbulento entrante. A concentração dos sólidos suspensos nessas correntes também pode influenciar na dispersão das correntes no lago, pois é capaz de absorver e refletir um grande espectro da energia luminosa, culminando na determinação da posição da termoclina. É óbvio que as explicações acima são muito simplificadas e carecem de uma análise quantitativa mais fundamentada, porém esta análise quantitativa interna dos reservatórios foge dos objetivos da presente dissertação.

Quanto à saída de água do reservatório, ilustrada na Figura 4.4 sua intensidade de descarga, posição da saída, a conformação da estratificação e a topografia determinam as condições a que ficará sujeito o corpo d'água. Podemos encontrar ou não um deslocamento da termoclina, além de uma conformação diferente das linhas de corrente no reservatório. Geralmente, temos a descarga de água localizada na região do hipolimnio, nas partes inferiores do reservatório (é claro que usando esta classificação, o mesmo está sendo considerado estratificado termicamente). Se a quantidade descarregada for pequena, isto implicará numa descarga de água apenas do hipolimnio, pois o *momentum* gerado não terá força suficiente para vencer a barreira de estabilidade imposta pela termoclina. Apesar de

menor que no metalimnio, um pequeno gradiente térmico pode ser encontrado no hipolimnio, sendo que um aumento da descarga poderá produzir por sua vez um deslocamento das águas da termoclina capaz de rebaixar o nível em que esta se encontra e promover uma diminuição do gradiente de temperatura do hipolimnio. Descargas realmente grandes poderão, por fim, provocar um escoamento potencial, onde todo o volume de água do lago estará sujeito às forças do *momentum* gerado. Esta análise foi feita para descargas realizadas na parte inferior do reservatório, porém raciocínio análogo poderá ser feito para outras localizações da estrutura de saída. Um estudo dessa dinâmica é muito importante quando se procura efetuar retiradas seletivas das águas do reservatório.

Figura 4.3: Correntes de densidade entrando no reservatório (WETZEL, 1975).

De uma maneira geral, a movimentação da água nos reservatórios é bastante complexa e apresenta padrões diferenciados de comportamento pois está sujeita pelo menos às variáveis explicitadas nesta seção. É certo que as águas superficiais estão sujeitas a um grau de agitação maior que as outras regiões, pois é o lugar que se confronta com as perturbações climáticas locais e também poderá estar sujeito às mesmas perturbações que influenciam as outras regiões. Já na região de hipolimnio, a sua condição de “morosidade”, pode provocar condições anóxicas, devido à falta de energia turbulenta para difusão de oxigênio. É óbvio que a dinâmica não consegue explicar sozinha um comportamento

influenciado pela biogeoquímica de um corpo d'água. Neste caso, é preciso complementar informações de diferentes áreas. Já o metalimnion mostrará a posição da barreira encontrada para a mistura das águas do lago. A identificação e previsão temporal de sua posição são importantes para quaisquer tomadas de decisões relativas às represas. A topografia, condições climáticas, posicionamento das saídas e entradas de água trarão para cada represa uma conformação única, semelhante em muitos casos, porém com desfecho indeterminado. A Figura 4.5 abaixo procura ilustrar os diversos movimentos descritos anteriormente. A complexidade das

Figura 4.4: Dinâmica de saída d'água do reservatório (IMBERGER, 1979).

forças da natureza na dinâmica dos reservatórios durante muito tempo ainda instigarão a curiosidade e a busca científica de suas causas e conseqüências. Apenas é correto afirmar que não estamos próximos do seu completo entendimento.

Figura 4.5: Mecanismos de mistura no reservatório, IMBERGER, 1979.

5 A REPRESA BILLINGS

O Reservatório Billings é o principal manancial do sistema hídrico da antiga ELETROPAULO – Eletricidade de São Paulo S.A. (atualmente sob responsabilidade da EMAE – Empresa Metropolitana de Águas e Energia S.A.), sendo capaz de receber as águas da Bacia dos rios Tietê e Pinheiros aduzidas pelas estações elevatórias de Traição (até 280 m³/s, 5 m acima) e Pedreira (até 270 m³/s, 25 m acima). Além dessa parcela o reservatório recebe a contribuição de pequenos rios do planalto da Serra do Mar e também do Rio Grande, já segmentado do corpo Central por barragem sob a Via Anchieta. Esta segmentação faz com que o reservatório seja seccionado em 2 compartimentos: o do Rio Grande, utilizado pela Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo (SABESP), que recalca cerca de 4,0 m³/s para abastecimento de água potável para a região do ABC, e o de Pedreira, que recebe as águas naturais das bacias contribuintes e das possíveis operações de recalque citadas acima. As águas acumuladas no reservatório Billings escoam em descargas regularizadas pelas Barragem Reguladora Billings-Pedras (Summit-Control), por um canal com cerca de 1,8 km de extensão, até o Reservatório do Rio das Pedras, situado já na vertente atlântica da Serra do Mar, responsável pela alimentação das tomadas d'água da Usina Henry Borden no sopé da mesma serra. A Figura 5.1 mostra o perfil esquemático do Sistema Hídrico da Eletropaulo.

Figura 5.1: Perfil esquemático do Sistema Hídrico da Eletropaulo – Atual EMAE (HIDROPLAN, 1995)

O reservatório se estende desde a zona sul da cidade de São Paulo até a vertente continental da serra do mar, passando pelos municípios de Diadema, São Bernardo do Campo, Santo André e Ribeirão Pires. Sua conformação dendrítica, apresenta um eixo principal, formador do corpo central, circundado à esquerda pelos braços do Rio Cocaia, Rio Bororé, Rio Taquacetuba, Rio Pedra Branca e Rio Capivari. À margem direita, temos o Rio Pequeno, o Rio Grande (segmentado), o Rio Alvarenga, o Rio Grota Funda, o Rio Guacuri e o Ribeirão dos Apuros. O primeiro terço do reservatório é interligado ao segundo terço por uma região de estrangulamento sob a Rodovia dos Imigrantes. A Figura 5.2 ilustra o reservatório, cujas principais características geométricas são:

Bacia Hidrográfica	377 Km ²
Área Inundada	126,8 Km ²
Volume Útil	1,15 x 10 ⁶ m ³
Nível Mínimo Útil Normal	732,0 m
Nível Máximo Útil Normal	746,5 m

Figura 5.2: Localização do Reservatório Billings (HIDROPLAN, 1995)

A adução de águas dos rios Tietê e Pinheiros é a responsável pela maior parte do aporte de nutrientes e sedimentos do reservatório (estima-se em 50 milhões de metros cúbicos de sedimento depositado em seu fundo desde o início da operação do reservatório, chegando a uma altura de até 7 m próximo à barragem de Pedreira). Este assoreamento constitui-se, atualmente, na maior fonte de poluentes na forma de metais pesados e nutrientes e acarreta uma das mais difíceis decisões para a adoção de técnicas de recuperação da represa. Como consequência, o bombeamento foi proibido por determinação da Constituição Estadual, exceto nos casos de cheias dos rios Tietê e Pinheiros.

O desenvolvimento da RMSP - Região Metropolitana de São Paulo (estima-se uma população de quase 480.000 habitantes nas bacias contribuintes ao reservatório) aliado ao intenso povoamento da Bacia Hidrográfica do Alto Tietê e a falta de tratamento de suas águas servidas, permitiram que dejetos urbanos e industriais fossem lançados indiscriminadamente no reservatório, bem como a ocupação da área de proteção de mananciais nas duas margens. Uma configuração da ocupação dos entornos é mostrada na Figura 5.3. Apesar disso, o seu tamanho e características permitem que hajam regiões de preservação permanente, reservas indígenas e locais onde se pratica pesca e recreação. Tamaña gama de utilização faz com que diversas instituições tenham competências sobre o reservatório. Qualquer ação relativa a ele requer um esforço imenso para congregiar todos os interessados, sejam eles do poder público, dos serviços de abastecimento, das companhias de energia e da própria sociedade civil. A recuperação da Billings não é só uma questão técnica, mas uma questão de cunho político e social.

A principal questão em pauta hoje em dia, é a utilização do reservatório para abastecimento de água em maior escala para atender a demanda da RMSP, visto que cada vez são maiores as pressões populares vindas da Bacia Hidrográfica dos Rios Piracicaba, Capivari e Jundiaí, que têm suas águas utilizadas para 60% do abastecimento público metropolitano paulistano, através do Sistema Cantareira-Imigrantes. Para tanto, é preciso recuperar a represa Billings no sentido de viabilizar este abastecimento público. Porém, esse processo de melhoria da qualidade de suas águas está vinculado à recuperação dos rios Tietê e Pinheiros. A Figura 5.4 mostra uma alternativa de Abastecimento proposta na SABESP, 1997, que utiliza o reservatório Billings.

Figura 5.3: Uso e ocupação do solo na bacia de drenagem do reservatório Billings

Figura 5.4: Alternativa de Abastecimento proposta na SABESP, 1997.

6 MODELO NUMÉRICO BIDIMENSIONAL VERTICALMENTE INTEGRADO DO RESERVATÓRIO BILLINGS

Pode-se dizer que uma intensa investigação sanitária e ecológica da represa Billings tem sido feita ao longo das últimas três décadas, porém o estudo do movimento de suas águas como um todo tem ficado à parte deste monitoramento. O tempo de residência é um dos poucos aspectos hidráulicos a ter sido investigado, juntamente com as correlações entre os períodos de bombeamento e as respostas da represa em relação à qualidade da água. O presente trabalho, tem como um de seus principais objetivos, a primeira aproximação da circulação das águas da represa Billings, utilizando um primeiro modelo relativamente simples, escolhido para direcionar as intenções de futuro detalhamento da hidrodinâmica e transporte de constituintes nesta represa, bem como direcionar coletas de dados compatíveis para calibração de modelos mais complexos. O sistema IPH-A ora utilizado incorpora a metodologia abaixo explicitada.

6.1 MODELO MATEMÁTICO PARA SIMULAÇÃO DA HIDRODINÂMICA

O modelo matemático aplicado é estabelecido com uma simplificação e posterior integração na vertical das equações de Navier-Stokes e de Conservação da Massa, representadas nas três dimensões cartesianas, culminando nas equações comumente utilizadas para o estudo do escoamento superficial de águas rasas. O procedimento usual é aqui apresentado de forma sucinta. Posteriormente à integração das equações, explicita-se o modelo numérico utilizado para sua resolução.

A conservação da massa para um volume de controle infinitesimal é dada por:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (6.1.1)$$

A conservação de *momentum* para o mesmo volume de controle infinitesimal em geral é fornecida por (aqui considera-se o efeito de rotação da Terra):

$$\begin{aligned} & \frac{\partial \rho u}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u^2)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho uv)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho uw)}{\partial z} - \rho f w + \rho f v \\ &= -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} \end{aligned} \quad (6.1.2)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial \rho v}{\partial t} + \frac{\partial(\rho uv)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v^2)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho vw)}{\partial z} - \rho f u + \rho f w \\ &= -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} \end{aligned} \quad (6.1.3)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial \rho w}{\partial t} + \frac{\partial(\rho uw)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho vw)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w^2)}{\partial z} - \rho f v + \rho f u \\ &= -\frac{\partial p}{\partial z} - \rho g + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} \end{aligned} \quad (6.1.4)$$

ρ é a densidade do fluido, u , v e w são as velocidades nas direções coordenadas x , y e z respectivamente, f é o fator de Coriolis correspondente à aceleração advinda da rotação da Terra, p representa a pressão, g a aceleração da gravidade e τ representa as tensões superficiais nas faces do volume de controle, sendo o primeiro subíndice relativo à direção normal à face sobre a qual a tensão atua, e o segundo subíndice relativo à direção em que a tensão atua. Índices iguais significam tensões normais e índices diferentes indicam tensões tangenciais. A Figura 6.1 ilustra o comentado.

Figura 6.1: Estado arbitrário de tensões num volume de controle qualquer.

Para admitir as primeiras simplificações, considera-se o escoamento incompressível, com o fluido tendo densidade homogênea, velocidades verticais desprezíveis e as acelerações verticais desprezíveis em relação à aceleração gravitacional, culminando numa distribuição hidrostática das pressões. Há desta forma o cancelamento das componentes verticais dos termos de Coriolis e dos termos que englobam velocidades verticais. Tal feito reduz as três últimas equações às seguintes formas:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho u}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u^2)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho uv)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho uw)}{\partial z} + \rho f v \\ = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} \end{aligned} \quad (6.1.5)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho v}{\partial t} + \frac{\partial(\rho uv)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v^2)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho vw)}{\partial z} - \rho f u \\ = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} \end{aligned} \quad (6.1.6)$$

$$\frac{\partial p}{\partial z} = -\rho g \quad (6.1.7)$$

As equações devem ser integradas na direção vertical. Algumas relações para os contornos verticais, ou seja, na superfície livre e no fundo, devem ser estabelecidas. As hipóteses a serem admitidas são a existência de um leito fixo e impermeável, a não alteração do volume do reservatório em relação à precipitação e evaporação e a suposição de que as tensões atuam nas direções dos eixos cartesianos. A primeira relação surge do balanço de massa num volume de controle localizado na superfície livre do reservatório, seguindo as indicações da Figura 6.2.

Figura 6.2: Balanço de massa na superfície

$$u|_{\eta} \frac{\partial \eta}{\partial x} + v|_{\eta} \frac{\partial \eta}{\partial y} - w|_{\eta} + \frac{\partial \eta}{\partial t} = 0 \quad (6.1.8)$$

η representa o nível d'água relativo à superfície livre.

No contorno de fundo o balanço de massa produz, de acordo com a Figura 6.3.

Figura 6.3: Balanço de massa no fundo

$$u|_{zb} \frac{\partial \eta}{\partial x} + v|_{zb} \frac{\partial \eta}{\partial y} - w|_{zb} = 0 \quad (6.1.9)$$

zb representa a cota de fundo. A profundidade h é expressa pela relação $h = \eta - zb$.

A seguir mostra-se o balanço das tensões no volume de controle da superfície livre, com as tensões tangenciais e normais, além da pressão sobre a parede do volume de controle. O balanço é realizado para cada direção cartesiana e segue o esquema da Figura 6.4.

Figura 6.4: Balanço de tensões na superfície

$$P_s \frac{\partial \eta}{\partial x} + \tau_{sx} = p|_{\eta} \frac{\partial \eta}{\partial x} - \tau_{xx}|_{\eta} \frac{\partial \eta}{\partial x} - \tau_{yx}|_{\eta} \frac{\partial \eta}{\partial y} + \tau_{zx}|_{\eta} \quad (6.1.10)$$

$$P_s \frac{\partial \eta}{\partial y} + \tau_{sy} = p|_{\eta} \frac{\partial \eta}{\partial y} - \tau_{xy}|_{\eta} \frac{\partial \eta}{\partial x} - \tau_{yy}|_{\eta} \frac{\partial \eta}{\partial y} + \tau_{zy}|_{\eta} \quad (6.1.11)$$

$$-P_s + \tau_{sx} \frac{\partial \eta}{\partial x} + \tau_{sy} \frac{\partial \eta}{\partial y} = -p|_{\eta} - \tau_{xx}|_{\eta} \frac{\partial \eta}{\partial x} - \tau_{yx}|_{\eta} \frac{\partial \eta}{\partial y} + \tau_{zz}|_{\eta} \quad (6.1.12)$$

De maneira similar, o balanço de tensões no fundo, de acordo com a Figura 6.5, produz:

$$P_b \frac{\partial zb}{\partial x} + \tau_{bx} = p|_{zb} \frac{\partial zb}{\partial x} - \tau_{xx}|_{zb} \frac{\partial zb}{\partial x} - \tau_{yx}|_{zb} \frac{\partial zb}{\partial y} + \tau_{zx}|_{zb} \quad (6.1.13)$$

$$P_b \frac{\partial zb}{\partial y} + \tau_{by} = p|_{zb} \frac{\partial zb}{\partial y} - \tau_{xy}|_{zb} \frac{\partial zb}{\partial x} - \tau_{yy}|_{zb} \frac{\partial zb}{\partial y} + \tau_{zy}|_{zb} \quad (6.1.14)$$

$$-P_b + \tau_{bx} \frac{\partial zb}{\partial x} + \tau_{by} \frac{\partial zb}{\partial y} = -p|_{zb} - \tau_{xx}|_{zb} \frac{\partial zb}{\partial x} - \tau_{yx}|_{zb} \frac{\partial zb}{\partial y} + \tau_{zz}|_{zb} \quad (6.1.15)$$

Figura 6.5: Balanço de tensões no fundo

De posse desses balanços, integramos na vertical as equações 6.1.1, 6.1.5 e 6.1.6 entre a cota de fundo e a superfície livre, obtendo:

$$\int_{zb}^{\eta} \frac{\partial p}{\partial t} dz + \int_{zb}^{\eta} \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} dz + \int_{zb}^{\eta} \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} dz + \int_{zb}^{\eta} \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} dz = 0 \quad (6.1.16)$$

$$\begin{aligned} & \int_{zb}^{\eta} \frac{\partial \rho u}{\partial t} dz + \int_{zb}^{\eta} \frac{\partial(\rho u^2)}{\partial x} dz + \int_{zb}^{\eta} \frac{\partial(\rho uv)}{\partial y} dz + \int_{zb}^{\eta} \frac{\partial(\rho uw)}{\partial z} dz + \int_{zb}^{\eta} \rho f v dz \\ & + \int_{zb}^{\eta} \frac{\partial p}{\partial x} dz - \int_{zb}^{\eta} \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} dz - \int_{zb}^{\eta} \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} dz - \int_{zb}^{\eta} \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} dz = 0 \end{aligned} \quad (6.1.17)$$

$$\begin{aligned} & \int_{zb}^{\eta} \frac{\partial \rho v}{\partial t} dz + \int_{zb}^{\eta} \frac{\partial(\rho uv)}{\partial x} dz + \int_{zb}^{\eta} \frac{\partial(\rho v^2)}{\partial y} dz + \int_{zb}^{\eta} \frac{\partial(\rho vw)}{\partial z} dz - \int_{zb}^{\eta} \rho f u dz \\ & + \int_{zb}^{\eta} \frac{\partial p}{\partial y} dz - \int_{zb}^{\eta} \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} dz - \int_{zb}^{\eta} \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} dz - \int_{zb}^{\eta} \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} dz = 0 \end{aligned} \quad (6.1.18)$$

Trocando a ordem da diferenciação e integração, obtém-se as relações encontradas nos balanços de massa e de tensões, possibilitando a redução dos termos das equações 6.1.16, 6.1.17 e 6.1.18, como mostrado a seguir:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} \int_{zb}^{\eta} \rho x dz - \rho|_{\eta} \frac{\partial \eta}{\partial t} + \rho|_{zb} \frac{\partial zb}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \int_{zb}^{\eta} \rho u x dz - \rho u|_{\eta} \frac{\partial \eta}{\partial x} + \rho u|_{zb} \frac{\partial zb}{\partial x} \\ & + \frac{\partial}{\partial y} \int_{zb}^{\eta} \rho x dz - \rho v|_{\eta} \frac{\partial \eta}{\partial y} + \rho v|_{zb} \frac{\partial zb}{\partial y} + \rho w|_{\eta} - \rho w|_{zb} = 0 \end{aligned} \quad (6.1.19)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} \int_{zb}^{\eta} \rho u x dz - \rho u|_{\eta} \frac{\partial \eta}{\partial t} + \rho u|_{zb} \frac{\partial zb}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \int_{zb}^{\eta} \rho u^2 dz - \rho u^2|_{\eta} \frac{\partial \eta}{\partial x} + \rho u^2|_{zb} \frac{\partial zb}{\partial x} \\ & + \frac{\partial}{\partial y} \int_{zb}^{\eta} \rho u v dz - \rho u v|_{\eta} \frac{\partial \eta}{\partial y} + \rho u v|_{zb} \frac{\partial zb}{\partial y} + \rho u w|_{\eta} - \rho u w|_{zb} + f \int_{zb}^{\eta} \rho v x dz \\ & + \frac{\partial}{\partial x} \int_{zb}^{\eta} \rho x dz - \rho|_{\eta} \frac{\partial \eta}{\partial x} + \rho|_{zb} \frac{\partial zb}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial x} \int_{zb}^{\eta} \tau_{xx} dz + \tau_{xx}|_{\eta} \frac{\partial \eta}{\partial x} - \tau_{xx}|_{zb} \frac{\partial zb}{\partial x} \\ & - \frac{\partial}{\partial y} \int_{zb}^{\eta} \tau_{yx} dz + \tau_{yx}|_{\eta} \frac{\partial \eta}{\partial y} - \tau_{yx}|_{zb} \frac{\partial zb}{\partial y} - \tau_{zx}|_{\eta} + \tau_{zx}|_{zb} = 0 \end{aligned} \quad (6.1.20)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} \int_{zb}^{\eta} \rho v x dz - \rho v|_{\eta} \frac{\partial \eta}{\partial t} + \rho v|_{zb} \frac{\partial zb}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \int_{zb}^{\eta} \rho u v x dz - \rho u v|_{\eta} \frac{\partial \eta}{\partial x} + \rho u v|_{zb} \frac{\partial zb}{\partial x} \\ & + \frac{\partial}{\partial y} \int_{zb}^{\eta} \rho v^2 dz - \rho v^2|_{\eta} \frac{\partial \eta}{\partial y} + \rho v^2|_{zb} \frac{\partial zb}{\partial y} + \rho v w|_{\eta} - \rho v w|_{zb} - f \int_{zb}^{\eta} \rho u x dz \\ & + \frac{\partial}{\partial y} \int_{zb}^{\eta} \rho x dz - \rho|_{\eta} \frac{\partial \eta}{\partial y} + \rho|_{zb} \frac{\partial zb}{\partial y} - \frac{\partial}{\partial x} \int_{zb}^{\eta} \tau_{xy} dz + \tau_{xy}|_{\eta} \frac{\partial \eta}{\partial x} - \tau_{xy}|_{zb} \frac{\partial zb}{\partial x} \\ & - \frac{\partial}{\partial y} \int_{zb}^{\eta} \tau_{yy} dz + \tau_{yy}|_{\eta} \frac{\partial \eta}{\partial y} - \tau_{yy}|_{zb} \frac{\partial zb}{\partial y} - \tau_{zy}|_{\eta} + \tau_{zy}|_{zb} = 0 \end{aligned} \quad (6.1.21)$$

Na equação 6.1.19, considerando os balanços de massa, as condições de leito fixo, escoamento incompressível e densidade constante, e ainda a seguinte notação para qualquer

grandeza denotada por F , $\bar{F} = \frac{1}{h} \int_{zb}^{\eta} F dz$, obtém-se a equação de conservação de massa

integrada na vertical, representada abaixo:

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial \bar{h}u}{\partial x} + \frac{\partial \bar{h}v}{\partial y} = 0 \quad (6.1.22)$$

Admitindo as mesmas hipóteses e as relações obtidas dos balanços de massa e tensões nos contornos de superfície e fundo, simplificam-se as equações 6.1.20 e 6.1.21 para

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{h}u}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \int_{zb}^{\eta} u^2 dz + \frac{\partial}{\partial y} \int_{zb}^{\eta} uv dz + f \bar{v}h + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x} \int_{zb}^{\eta} \rho x dz - \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x} \int_{zb}^{\eta} \tau_{xx} dz \\ - \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial y} \int_{zb}^{\eta} \tau_{yx} dz - \frac{1}{\rho} (\tau_{xx} - \tau_{bx}) + \frac{1}{\rho} P_b \frac{\partial zb}{\partial x} - \frac{1}{\rho} P_s \frac{\partial \eta}{\partial x} = 0 \end{aligned} \quad (6.1.23)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{h}v}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \int_{zb}^{\eta} uv dz + \frac{\partial}{\partial y} \int_{zb}^{\eta} v^2 dz - f \bar{u}h + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial y} \int_{zb}^{\eta} \rho x dz - \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x} \int_{zb}^{\eta} \tau_{xy} dz \\ - \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial y} \int_{zb}^{\eta} \tau_{yy} dz - \frac{1}{\rho} (\tau_{yy} - \tau_{by}) + \frac{1}{\rho} P_b \frac{\partial zb}{\partial y} - \frac{1}{\rho} P_s \frac{\partial \eta}{\partial y} = 0 \end{aligned} \quad (6.1.24)$$

Uma simplificação adicional ainda pode ser obtida considerando que não há variação de pressão na superfície e essa, como nível de referência, assume valor nulo. A distribuição de pressão hidrostática leva às seguintes relações

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x} \int_{zb}^{\eta} \rho x dz = gh \frac{\partial h}{\partial x} \quad (6.1.25)$$

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial y} \int_{zb}^{\eta} \rho x dz = gh \frac{\partial h}{\partial y} \quad (6.1.26)$$

$$\frac{1}{\rho} P_b \frac{\partial zb}{\partial x} = gh \frac{\partial zb}{\partial x} \quad (6.1.27)$$

$$\frac{1}{\rho} P_b \frac{\partial zb}{\partial y} = gh \frac{\partial zb}{\partial y} \quad (6.1.28)$$

Somando-se as relações 6.1.25 e 6.1.27 e as relações 6.1.26 e 6.1.28, teremos respectivamente

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x} \int_{z_b}^{\eta} \rho x dz + \frac{1}{\rho} P_b \frac{\partial z_b}{\partial x} = gh \frac{\partial \eta}{\partial x} \quad (6.1.29)$$

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial y} \int_{z_b}^{\eta} \rho y dz + \frac{1}{\rho} P_b \frac{\partial z_b}{\partial y} = gh \frac{\partial \eta}{\partial y} \quad (6.1.30)$$

As equações resultantes utilizando esta última simplificação são

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{u}h}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \int_{z_b}^{\eta} u^2 dz + \frac{\partial}{\partial y} \int_{z_b}^{\eta} uv dz + f \bar{v}h + gh \frac{\partial \eta}{\partial x} \\ - \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x} \int_{z_b}^{\eta} \tau_{xx} dz - \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial y} \int_{z_b}^{\eta} \tau_{yx} dz - \frac{1}{\rho} (\tau_{sx} - \tau_{bx}) = 0 \end{aligned} \quad (6.1.31)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{v}h}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \int_{z_b}^{\eta} uv dz + \frac{\partial}{\partial y} \int_{z_b}^{\eta} v^2 dz - f \bar{u}h + gh \frac{\partial \eta}{\partial y} \\ - \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x} \int_{z_b}^{\eta} \tau_{xy} dz - \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial y} \int_{z_b}^{\eta} \tau_{yy} dz - \frac{1}{\rho} (\tau_{sy} - \tau_{by}) = 0 \end{aligned} \quad (6.1.32)$$

Como se trabalha em situações reais com escoamentos turbulentos, cabe aqui enfatizar as seguintes relações, envolvendo as velocidades, suas médias e seus afastamentos dos valores médios na direção vertical

$$\begin{aligned} u(z) &= \bar{u} + u'(z) \\ v(z) &= \bar{v} + v'(z) \\ \int_{z_b}^{\eta} u'(z) dz &= 0 \\ \int_{z_b}^{\eta} v'(z) dz &= 0 \end{aligned} \quad (6.1.33)$$

Nesse caso $\bar{u}$ representa a velocidade média integrada na vertical e u' o desvio ou flutuação da velocidade turbulenta em relação a esse valor médio.

As tensões internas τ_{xx} , τ_{xy} e τ_{yy} descritas anteriormente são geradas pela viscosidade do fluido e pelas flutuações de velocidade provocadas pela turbulência, gerando cisalhamento. As tensões turbulentas são conhecidas na Mecânica dos Fluidos como as Tensões de Reynolds. Abaixo apresenta-se a sua representação matemática usual, extraída, neste caso, de PONCE (1978).

$$\tau_{xy} = -\tau_{yx} = \rho \nu \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) - \overline{\rho u' v'} \quad (6.1.34)$$

$$\tau_{xx} = 2\rho \nu \frac{\partial u}{\partial y} - 2\overline{\rho u'^2} \quad (6.1.35)$$

$$\tau_{yy} = 2\rho \nu \frac{\partial v}{\partial x} - 2\overline{\rho v'^2} \quad (6.1.36)$$

ν representa a viscosidade cinemática do fluido.

Para manipular os resultados obtidos, no sentido de obter relações mais utilizáveis, efetua-se:

$$u^2 = (u - \bar{u})^2 + 2u\bar{u} - \bar{u}^2 \quad (6.1.37)$$

$$uv = (u - \bar{u})(v - \bar{v}) + u\bar{v} + v\bar{u} - \bar{u}\bar{v} \quad (6.1.38)$$

$$v^2 = (v - \bar{v})^2 + 2v\bar{v} - \bar{v}^2 \quad (6.1.39)$$

As integrações na vertical resultam

$$\int_{zb}^{\eta} u^2 dz = \int_{zb}^{\eta} (u - \bar{u})^2 dz + 2\bar{u}^2 h - \bar{u}^2 h = \int_{zb}^{\eta} (u - \bar{u})^2 dz + \bar{u}^2 h \quad (6.1.40)$$

$$\int_{zb}^{\eta} uv dz = \int_{zb}^{\eta} (u - \bar{u})(v - \bar{v}) dz + \bar{u}\bar{v}h - \bar{u}\bar{v}h + \bar{u}\bar{v}h = \int_{zb}^{\eta} (u - \bar{u})(v - \bar{v}) dz + \bar{u}\bar{v}h \quad (6.1.41)$$

$$\int_{zb}^{\eta} v^2 dz = \int_{zb}^{\eta} (v - \bar{v})^2 dz + 2\bar{v}^2 h - \bar{v}^2 h = \int_{zb}^{\eta} (v - \bar{v})^2 dz + \bar{v}^2 h \quad (6.1.42)$$

O uso destas relações nas equações de *momentum* conduz a

$$\frac{\partial \bar{u}h}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u}^2 h}{\partial x} + \frac{\partial \bar{u}\bar{v}h}{\partial y} + f\bar{v}h + gh \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \int_{zb}^{\eta} (u - \bar{u})^2 dz \quad (6.1.43)$$

$$- \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x} \int_{zb}^{\eta} \tau_{xx} dz + \frac{\partial}{\partial y} \int_{zb}^{\eta} (u - \bar{u})(v - \bar{v}) dz - \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial y} \int_{zb}^{\eta} \tau_{yx} dz - \frac{1}{\rho} (\tau_{xx} - \tau_{bx}) = 0$$

$$\frac{\partial \bar{v}h}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u}\bar{v}h}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}^2 h}{\partial y} - f\bar{u}h + gh \frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \int_{zb}^{\eta} (u - \bar{u})(v - \bar{v}) dz - \quad (6.1.44)$$

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x} \int_{zb}^{\eta} \tau_{xy} dz + \frac{\partial}{\partial y} \int_{zb}^{\eta} (v - \bar{v})^2 dz - \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial y} \int_{zb}^{\eta} \tau_{yy} dz - \frac{1}{\rho} (\tau_{xy} - \tau_{by}) = 0$$

Definindo a tensão efetiva pode-se simplificar a notação da equação

$$T_{xx} = \frac{1}{h} \int_{zb}^{\eta} [\tau_{xx} - \rho(u - \bar{u})^2] dz \quad (6.1.45)$$

$$T_{xy} = T_{yx} = \frac{1}{h} \int_{zb}^{\eta} [\tau_{xy} - \rho(u - \bar{u})(v - \bar{v})] dz \quad (6.1.46)$$

$$T_{yy} = \frac{1}{h} \int_{zb}^{\eta} [\tau_{yy} - \rho(v - \bar{v})^2] dz \quad (6.1.47)$$

Rearranjando adequadamente para representar a tensão efetiva

$$\begin{aligned} & \int_{zb}^{\eta} (u - \bar{u})^2 dz - \frac{1}{\rho} \int_{zb}^{\eta} \tau_{xx} dz + \int_{zb}^{\eta} (u - \bar{u})(v - \bar{v}) dz \\ & - \frac{1}{\rho} \int_{zb}^{\eta} \tau_{xy} dz = -\frac{1}{\rho} (hT_{xx}) - \frac{1}{\rho} (hT_{xy}) \end{aligned} \quad (6.1.48)$$

$$\begin{aligned} & \int_{zb}^{\eta} (u - \bar{u})(v - \bar{v}) dz - \frac{1}{\rho} \int_{zb}^{\eta} \tau_{xx} dz + \int_{zb}^{\eta} (v - \bar{v})^2 dz \\ & - \frac{1}{\rho} \int_{zb}^{\eta} \tau_{yy} dz = -\frac{1}{\rho} (hT_{xy}) - \frac{1}{\rho} (hT_{yy}) \end{aligned} \quad (6.1.49)$$

As equações de conservação de *momentum* tomam, com as equações anteriores, a seguinte forma

$$\begin{aligned} & \frac{\partial \bar{u}h}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u}^2 h}{\partial x} + \frac{\partial \bar{u}v h}{\partial y} + f\bar{v}h + gh \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x} (hT_{xx}) \\ & - \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial y} (hT_{xy}) - \frac{1}{\rho} (\tau_{xx} - \tau_{bx}) = 0 \end{aligned} \quad (6.1.50)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial \bar{v}h}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u}v h}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}^2 h}{\partial y} - f\bar{u}h + gh \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x} (hT_{xy}) \\ & - \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial y} (hT_{yy}) - \frac{1}{\rho} (\tau_{yy} - \tau_{by}) = 0 \end{aligned} \quad (6.1.51)$$

Nota-se, já que a hipótese de leito fixo nos traz $\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial \eta}{\partial t}$, o surgimento da equação

de conservação da massa reduzindo a notação

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{u}h}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u}^2 h}{\partial x} + \frac{\partial \bar{u}v h}{\partial y} &= \bar{u} \frac{\partial \eta}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{u}h}{\partial x} + \bar{u} \frac{\partial \bar{v}h}{\partial y} \\ + h \frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \bar{u}h \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \bar{v}h \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} &= h \frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \bar{u}h \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \bar{v}h \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} \end{aligned} \quad (6.1.52)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{v}h}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u}v h}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}^2 h}{\partial y} &= \bar{v} \frac{\partial \eta}{\partial t} + \bar{v} \frac{\partial \bar{u}h}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{v}h}{\partial y} \\ + h \frac{\partial \bar{v}}{\partial t} + \bar{u}h \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} + \bar{v}h \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} &= h \frac{\partial \bar{v}}{\partial t} + \bar{u}h \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} + \bar{v}h \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} \end{aligned} \quad (6.1.53)$$

Para chegar à forma final usual das equações integradas na vertical, divide-se todos os termos das equações por h e volta-se a representar conjuntamente a equação de conservação da massa. Com tais equações pode-se definir o campo de velocidades e o nível da água em função do tempo e do espaço.

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u}h}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}h}{\partial y} = 0 \quad (3.1.3.1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + f\bar{v} + g \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{1}{\rho h} \frac{\partial}{\partial x} (hT_{xx}) \\ - \frac{1}{\rho h} \frac{\partial}{\partial y} (hT_{xy}) - \frac{1}{\rho h} (\tau_{xx} - \tau_{bx}) = 0 \end{aligned} \quad (3.1.3.2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{v}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} - f\bar{u} + g \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{1}{\rho h} \frac{\partial}{\partial x} (hT_{xy}) \\ - \frac{1}{\rho h} \frac{\partial}{\partial y} (hT_{yy}) - \frac{1}{\rho h} (\tau_{yy} - \tau_{by}) = 0 \end{aligned} \quad (3.1.3.3)$$

O desenvolvimento do modelo matemático pode ser considerado "completo" definindo-se os termos que envolvem a força de *Coriolis*, a tensão efetiva e as tensões externas na superfície e fundo. Apresenta-se a seguir as formulações pertinentes. O termo f quantifica a aceleração inercial atuante nas massas d'água devido à rotação da terra. DRONKERS apud OLIVEIRA DE JESUS (1989) apresentam em seus trabalhos a seguinte forma de quantificação desta aceleração:

$$f = 2\omega \sin \psi \quad (6.1.54)$$

ω é a velocidade angular da terra e ψ , a latitude da região estudada.

O termo contendo a tensão efetiva para utilização nos modelos, na literatura consultada, não apresenta um desfecho na sua quantificação. PONCE et al. (op. cit.) aponta três tipos de tensões que compõem a tensão efetiva: a tensão devido à viscosidade, a tensão turbulenta e a tensão gerada pela integração do perfil de velocidades ao tornar uniforme a distribuição das velocidades ao longo da vertical. LEENDERTSE (op. cit.) despreza este termo, que é considerado por FLOKSTRA (1977) como condição necessária mas não suficiente para haver circulação secundária, esta sendo definida como uma região compreendida dentro dos entornos de uma linha de corrente fechada.. KUIPERS & VREUGDENHIL apud PONCE et al. (op. cit.) e apud ABBOTT et. al., BORCHE (op. cit.) e ROSMAN (op. cit.) incluem termos de dissipação turbulenta, que na verdade representam a tensão efetiva. A formulação empírica citada anteriormente é adotada também por OLIVEIRA DE JESUS (op. cit.). A definição adotada no presente modelo, e descrita pelos autores citados é:

$$\frac{1}{\rho h} \left[\frac{\partial}{\partial x} (hT_{xx}) + \frac{\partial}{\partial y} (hT_{xy}) \right] = \nu_t \left(\frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial y^2} \right) \quad (6.1.55)$$

$$\frac{1}{\rho h} \left[\frac{\partial}{\partial x} (hT_{xy}) + \frac{\partial}{\partial y} (hT_{yy}) \right] = \nu_t \left(\frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial y^2} \right) \quad (6.1.56)$$

onde:

ν_t - coeficiente de dissipação turbulenta.

As tensões na superfície quantificam a ação do vento em atrito com o espelho da água e podem ser calculadas pela formulação apresentada por BORCHE (1996).

$$\tau_{xx} = C_w \rho W_x (W_x^2 + W_y^2)^{1/2} \quad (6.1.57)$$

$$\tau_{yy} = C_w \rho W_y (W_x^2 + W_y^2)^{1/2} \quad (6.1.58)$$

W_x e W_y são as componentes da velocidade do vento e C_w , o coeficiente de atrito do vento.

Maior rigor na coleta de dados é requisitado pela formulação desenvolvida por DRONKERS apud OLIVEIRA DE JESUS (op. cit.)^{III}, cuja representação é:

^{III}DRONKERS, J. J.(1964). Tidal Computations in Rivers and Coastal Waters. Nova Yorque, J. Wiley & Sons, Inc. apud OLIVEIRA DE JESUS, J. A. (1989). *Modelo Numérico*

$$\tau_{sx} = \theta \rho_{ar} W_{10}^2 \sin \varphi \quad (6.1.59)$$

$$\tau_{sy} = \theta \rho_{ar} W_{10}^2 \cos \varphi \quad (6.1.60)$$

θ é o coeficiente de cisalhamento do vento, ρ_{ar} , a densidade do ar, W_{10} , a velocidade do vento a 10 m da superfície e φ é ângulo da direção do vento com o eixo Oy

SALOMON apud OLIVEIRA DE JESUS (op. cit.)¹¹¹ apresentam uma tabela para os coeficientes de cisalhamento do vento para diversos estuários no mundo cujos valores variam de 0,0009 até 0,0062.

Os termos que englobam as tensões de fundo, são definidos através da formulação de Chézy abaixo

$$\tau_{bx} = \frac{\rho g \bar{u} (\bar{u}^2 + \bar{v}^2)^{1/2}}{Ch^2} \quad (6.1.61)$$

$$\tau_{by} = \frac{\rho g \bar{v} (\bar{u}^2 + \bar{v}^2)^{1/2}}{Ch^2} \quad (6.1.62)$$

No caso, Ch representa o coeficiente de Chézy.

6.2 O MODELO MATEMÁTICO DO TRANSPORTE DE MASSA

O modelo matemático utilizado no transporte de massa leva em consideração os fluxos advectivos e difusivos num determinado volume de controle infinitesimal. A equação tradicional de advecção-difusão para as três direções cartesianas é utilizada

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \frac{\partial(cu)}{\partial x} + \frac{\partial(cv)}{\partial y} + \frac{\partial(cw)}{\partial z} = -\left(\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z}\right) + S \quad (6.2.1)$$

de Circulação e Qualidade da Água em Estuários bem Misturados . Aplicação no Estuário do Guaíba. São Carlos. 162p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo.

¹¹¹SALOMON, J. C.. Étude de L'Estuaire de La Seine. Universidade da Bretanha Ocidental, Faculdade de Ciências Técnicas apud OLIVEIRA DE JESUS, J. A. (1989). Modelo Numérico de Circulação e Qualidade da Água em Estuários bem Misturados . Aplicação no Estuário do Guaíba. São Carlos. 162p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo.

c representa a concentração de um constituinte passivo q_x , q_y e q_z , os fluxos de massa nas respectivas direcções e S , o termo de fonte ou sumidouro. Os fluxos turbulentos são definidos por uma analogia a primeira lei de Fick:

$$q_x = -\varepsilon_x \frac{\partial c}{\partial x} \quad (6.2.2)$$

$$q_y = -\varepsilon_y \frac{\partial c}{\partial y} \quad (6.2.3)$$

$$q_z = -\varepsilon_z \frac{\partial c}{\partial z} \quad (6.2.4)$$

ε_x , ε_y e ε_z são os coeficientes de difusão turbulenta nas respectivas direcções.

Integrando a equação 6.2.1 ao longo da vertical, e alterando a ordem entre integração e diferenciação, obtém-se:

$$\begin{aligned} & \int_{z_b}^{\eta} \left(\frac{\partial c}{\partial t} + \frac{\partial(cu)}{\partial x} + \frac{\partial(cv)}{\partial y} + \frac{\partial(cw)}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} q_x + \frac{\partial}{\partial y} q_y + \frac{\partial}{\partial z} q_z + S \right) dz = \\ & \frac{\partial}{\partial t} \int_{z_b}^{\eta} c dz - c \Big|_{\eta} \frac{\partial \eta}{\partial t} + c \Big|_{z_b} \frac{\partial z_b}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \int_{z_b}^{\eta} cudz - cu \Big|_{\eta} \frac{\partial \eta}{\partial x} + cu \Big|_{z_b} \frac{\partial z_b}{\partial x} \\ & + \frac{\partial}{\partial y} \int_{z_b}^{\eta} cvdz - cv \Big|_{\eta} \frac{\partial \eta}{\partial y} + cv \Big|_{z_b} \frac{\partial z_b}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} \int_{z_b}^{\eta} cwdz + cw \Big|_{\eta} \frac{\partial \eta}{\partial z} - cw \Big|_{z_b} \frac{\partial z_b}{\partial z} \\ & + \frac{\partial}{\partial x} \int_{z_b}^{\eta} q_x dz - q_x \Big|_{\eta} \frac{\partial \eta}{\partial x} + q_x \Big|_{z_b} \frac{\partial z_b}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \int_{z_b}^{\eta} q_y dz - q_y \Big|_{\eta} \frac{\partial \eta}{\partial y} + q_y \Big|_{z_b} \frac{\partial z_b}{\partial y} \\ & + \frac{\partial}{\partial z} \int_{z_b}^{\eta} q_z dz + q_z \Big|_{\eta} \frac{\partial \eta}{\partial z} - q_z \Big|_{z_b} \frac{\partial z_b}{\partial z} = \\ & \frac{\partial \bar{c}h}{\partial t} + \frac{\partial(\bar{c}h\bar{u})}{\partial x} + \frac{\partial(\bar{c}h\bar{v})}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} h\bar{q}_x + \frac{\partial}{\partial y} h\bar{q}_y + \bar{S}h - c \Big|_{\eta} \frac{\partial \eta}{\partial t} - cu \Big|_{\eta} \frac{\partial \eta}{\partial x} \\ & - cv \Big|_{\eta} \frac{\partial \eta}{\partial y} + cw \Big|_{\eta} \frac{\partial \eta}{\partial z} + cu \Big|_{z_b} \frac{\partial z_b}{\partial x} + cv \Big|_{z_b} \frac{\partial z_b}{\partial y} - cw \Big|_{z_b} \frac{\partial z_b}{\partial z} \\ & - q_x \Big|_{\eta} \frac{\partial \eta}{\partial x} + q_x \Big|_{z_b} \frac{\partial z_b}{\partial x} - q_y \Big|_{\eta} \frac{\partial \eta}{\partial y} + q_y \Big|_{z_b} \frac{\partial z_b}{\partial y} = 0 \end{aligned} \quad (6.2.5)$$

Empregando os balanços de massa na superfície e fundo (multiplicados por c) que conduz ao anulamento de variáveis e lembrando que os fluxos de massa nesses mesmos contornos também são nulos (fronteiras impermeáveis aos constituintes), chegamos às formas finais:

$$\frac{\partial \bar{c}h}{\partial t} + \frac{\partial(\bar{c}h\bar{u})}{\partial x} + \frac{\partial(\bar{c}h\bar{v})}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x}h(\bar{q}_x + \overline{u'c'}) + \frac{\partial}{\partial y}h(\bar{q}_y + \overline{v'c'}) + \bar{S}h = 0 \quad (6.2.6)$$

$\bar{c}$, $\bar{q}_i$ e $\overline{u'_i c'}$ são respectivamente, a concentração, o fluxo de massa difusivo e a advecção diferenciada, integrados na vertical.

Por definição, a integração na vertical das flutuações de quaisquer grandezas, sejam elas velocidades ou concentrações, é zero. Mas os produtos de flutuações, como o termo $\overline{u'c'}$ não se anulam e são característicos do transporte turbulento. Segundo OLIVEIRA de JESUS (1989), a parcela turbulenta pode ser representada da seguinte maneira na direção do eixo Ox , o mesmo valendo para a direção do eixo Oy .

$$\overline{q_x} + \overline{u'c'} = -(\varepsilon_{xx} + K'_{xx}) \frac{\partial \bar{c}}{\partial x} - (\varepsilon_{xy} + K'_{xy}) \frac{\partial \bar{c}}{\partial y} \quad (6.2.7)$$

sendo ε , o coeficiente de difusão turbulenta e K' , o coeficiente de advecção diferenciada. Os termos em xy exprimem a difusão lateral, de ordem de grandeza bem menor que os termos de difusão longitudinal em xx . Segundo LEENDERTSEE (1970), os coeficientes laterais são responsáveis pela anisotropia no transporte, porém aumentam muito o esforço de modelagem, de maneira que são normalmente desprezados. Adicionando os coeficientes longitudinais, chega-se à seguinte equação para o transporte de massa

$$\frac{\partial \bar{c}h}{\partial t} + \frac{\partial(\bar{c}h\bar{u})}{\partial x} + \frac{\partial(\bar{c}h\bar{v})}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x}(hD_x \frac{\partial \bar{c}}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(hD_y \frac{\partial \bar{c}}{\partial y}) + \bar{S}h = 0 \quad (6.2.8)$$

D_x e D_y são os coeficientes de dispersão turbulenta ao longo do eixo Ox e do eixo Oy , respectivamente. Estes são aqui calculados em função dos coeficientes de dispersão transversal e longitudinal denotados respectivamente pelos subscritos t e l , de acordo com o ângulo θ formado entre o vetor velocidade e o eixo Ox .

$$D_x = D_l \cos^2 \theta + D_t \sin^2 \theta \quad (6.2.9)$$

$$D_y = D_l \sin^2 \theta + D_t \cos^2 \theta \quad (6.2.10)$$

Com a finalidade de fornecer uma estimativa inicial, alguns dos trabalhos que envolvem tais coeficientes, ou adotam valores constantes durante todo o cálculo ou indicam as relações abaixo:

$$D_t = \frac{5.93h\bar{u}\sqrt{g}}{C_h} \quad (6.2.11)$$

$$D_t = \frac{0.23h\bar{u}\sqrt{g}}{C_h} \quad (6.2.12)$$

Leendertsee, 1970, ressalta ainda a dependência do coeficiente em relação ao tamanho da largura das células de cálculo, das variações locais transversais das velocidades tomadas como média na vertical, dos efeitos locais das ondas e ventos, além dos valores das equações acima. Para uma melhor aproximação, deve-se empregar uma campanha de medições, em vista da grande discrepância encontrada entre os valores utilizados na prática.

Para simplificar a notação ao longo do restante do texto, em todas as variáveis verticalmente integradas é abolida a utilização das barras horizontais, ficando evidentemente a ressalva de que todas as variáveis estão vinculadas ao modelo verticalmente integrado.

6.3 MODELO NUMÉRICO PARA RESOLUÇÃO DAS EQUAÇÕES

Os modelos matemáticos utilizados para a representação do escoamento e transporte de massa no reservatório mostrados no capítulo anterior são descritos por uma série de equações diferenciais parciais. Geralmente a geometria de um sistema implica em uma grande quantidade de termos incorporados às equações e sua variação ao longo do tempo e espaço tornam impossível a obtenção de uma solução analítica para esta série de equações. Porém, métodos numéricos computacionais de cálculo podem ser empregados para a obtenção da solução aproximada em pontos discretos de um domínio de cálculo. Métodos baseados em diferenças finitas e elementos finitos foram desenvolvidos ao longo das últimas três décadas para obter soluções numéricas viáveis das referidas equações (ver revisão bibliográfica).

O *Software* IPH-A vêm sendo desenvolvido ao longo dos últimos anos pelo IPH/UFRGS (Instituto de Pesquisas Hidráulicas/Universidade Federal do Rio Grande do Sul). Utilizado para determinação de correntes e dispersão de poluentes ao longo de reservatórios, lagos ou estuários, incorpora um método numérico baseado no esquema de diferenças finitas. A discretização da hidrodinâmica se vale de um esquema implícito de

direções alternadas (ADI), baseado nos trabalhos de LEENDERTSE (op. cit.). No caso do transporte de massa, o esquema QUICK proposto por LEONARD (1979), foi incorporado. A versatilidade do modelo em incorporar os dados referentes ao corpo d'água pretendido para o estudo, aliado à possibilidade de ajuda no seu próprio desenvolvimento (interação entre o pesquisador responsável pelo desenvolvimento do modelo e o usuário do mesmo), bem como a troca de informações entre grupos de pesquisa nacionais encorajaram a escolha deste aplicativo. Este é a base para as simulações efetuadas neste trabalho, ficando posteriormente à disposição dos estudantes e pesquisadores do CRHEA/EESC/USP. Algumas de suas características são aqui descritas, bem como a formulação básica que nele é utilizada. O Apêndice apresenta a transcrição do manual do sistema IPH-A.

Nos métodos de diferenças finitas, a representação espacial da represa é feita numa malha em cujos pontos são definidas as variáveis consideradas relevantes. Os diferenciais das equações, de tamanho infinitesimal, são aproximados por diferenças em intervalos de tempo e espaço definidos e que são, portanto, de natureza finita. A simples troca entre diferenças "infinitesimais" por finitas não vem desacompanhada de alguns contratempos, como o erro de truncamento das diferenças e a necessidade de impor consistência e estabilidade ao modelo.

Como exposto anteriormente, definiram-se as variáveis de acordo com a malha abaixo (ver Figura 6.6), onde as variáveis η , c e o coeficiente de resistência são definidos nos pontos (i, j) , a variável u e a batimetria no pontos $(i + \frac{1}{2}, j)$ e a variável v e a batimetria no ponto $(i, j + \frac{1}{2})$. Apesar de não estarem definidos no mesmo ponto, podemos utilizar apenas os índices espaciais i e j , retirando o índice $\frac{1}{2}$, ao nos referirmos ao ponto da variável, pois não haverá ambigüidades, visto que o índice é somado à i só para variável u e somado à j somente para variável v . Este artifício é utilizado para representar melhor os fluxos nas células de controle.

Figura 6.6: Localização das variáveis numa célula de cálculo.

No cálculo hidrodinâmico, o grupo de equações contém termos não lineares, como por exemplo $u \frac{\partial u}{\partial x}$. Tais termos pedem a utilização de métodos iterativos de resolução. O artifício de utilizar valores já conhecidos do tempo anterior na derivada espacial é um processo de linearização das equações. No esquema de discretização utilizado, além dessa linearização, utiliza-se um esquema centrado para as derivadas espaciais e progressivo para as derivadas temporais. A partir disso podem ser obtidos os coeficientes multiplicadores das variáveis, que formarão, neste caso, uma matriz tridiagonal. São aplicadas as condições iniciais e as condições nos contornos de montante e jusante, completando o sistema de equações.

A Equação de Conservação de Massa (eq. 3.1.3.1) é resolvida implicitamente a cada $\frac{1}{2} \Delta t$ (Δt é o incremento temporal). Também implicitamente, a Equação de Conservação de *momentum* na direção do eixo Ox (eq. 3.1.3.2) (velocidade u) é resolvida a cada Δt , nos tempos $t + \frac{1}{2} \Delta t$ e a Equação de Conservação de *momentum* na direção do eixo Oy (velocidade v) (eq. 3.1.3.3) também a cada Δt , mas nos tempos $t + \Delta t$. A eq. 3.1.3.3, então, é resolvida explicitamente no tempo $t + \frac{1}{2} \Delta t$ e a eq. 3.1.3.2, também explicitamente, no tempo $t + \Delta t$. A partir de um tempo $k = t$, conhecidas as variáveis, passamos para um tempo $k + \frac{1}{2} \Delta t = t + \frac{1}{2} \Delta t$, onde é fixado o valor de j (iniciando-se com $j = 1$), resolvendo-se o valor das variáveis ao longo das colunas i , passando a seguir a fixar o valor em $j + 1$, procedendo-se de maneira análoga até $j = m$ (último linha). Para o tempo $t + \Delta t$ é fixado o valor da coluna i (iniciando-se com $i = 1$), resolvendo-se o valor das variáveis ao longo das linhas j , passando a seguir a fixar o valor em $i + 1$, procedendo-se de maneira análoga até $i = n$ (último ponto da linha), completando-se a análise de um tempo $t + \Delta t$ para toda a malha. De maneira análoga chega-se ao tempo $t + 2\Delta t$ e, repetidamente, chegando ao final do tempo de análise.

A seguir apresenta-se a forma das equações com os coeficientes a serem empregados no sistema matricial, de acordo com o esquema de aproximação descrito anteriormente.

Para a eq. 3.1.3.2, para o tempo $k + 1/2$:

$$T\eta_{i,j}^{k+1/2} + A_i u_{i,j}^{k+1/2} - T\eta_{i+1,j}^{k+1/2} = B_i \quad (6.3.1)$$

Para a eq.3.1.3.1 no tempo $k + 1/2$:

$$C_i u_{i-1,j}^{k+1/2} + \eta_{i,j}^{k+1/2} + D_i u_{i,j}^{k+1/2} = E_i \quad (6.3.2)$$

onde:

$$T = -\frac{g\Delta t}{2\Delta x} \quad (6.3.3)$$

$$A_i = 1 + \frac{1}{2}\Delta t \left[\frac{1}{2}(f_{i,j}^k + f_{i+1,j}^k) \frac{\left((u_{i,j}^k)^2 + \left(\frac{1}{4}(v_{i,j-1}^k + v_{i+1,j-1}^k + v_{i,j}^k + v_{i+1,j}^k) \right)^2 \right)^{1/2}}{\left(\frac{\eta_{i,j-1}^k + \eta_{i,j}^k}{2} - \frac{z_{bi,j} + z_{bi,j-1}}{2} \right)} \right] + \quad (6.3.4)$$

$$\frac{u_{i,j-1}^k + u_{i,j-1}^k}{2\Delta x} \left] \right.$$

$$B_i = u_{i,j}^k - \frac{1}{2}\Delta t \left[\left(\frac{1}{4}(v_{i,j-1}^k + v_{i+1,j-1}^k + v_{i,j}^k + v_{i+1,j}^k) \right) \left(\frac{u_{i,j-1}^k + u_{i,j-1}^k}{2\Delta y} \right) \right] \quad (6.3.5)$$

$$C_i = -\frac{\Delta t}{4\Delta x} (\eta_{i,j}^k + \eta_{i+1,j}^k - z_{bi,j} - z_{bi,j-1}) \quad (6.3.6)$$

$$D_i = \frac{\Delta t}{4\Delta x} (\eta_{i+1,j}^k + \eta_{i,j}^k - z_{bi,j} - z_{bi,j-1}) \quad (6.3.7)$$

$$E_i = \eta_{i,j}^k - \frac{1}{2}\Delta t \left[\frac{\left(\frac{\eta_{i,j-1}^k + \eta_{i,j}^k}{2} - \frac{z_{bi,j} + z_{bi,j-1}}{2} \right) v_{i,j}^k}{\Delta y} - \frac{\left(\frac{\eta_{i,j}^k + \eta_{i,j-1}^k}{2} - \frac{z_{bi,j-1} + z_{bi,j-1}}{2} \right) v_{i,j-1}^k}{\Delta y} \right] \quad (6.3.8)$$

Segundo PONCE *et al.* (op. cit.), a natureza implícita das equações está na presença de três variáveis desconhecidas na formulação da equação de diferenças finitas das equações 3.1.3.1 e 3.1.3.2. A linearização da equação 3.1.3.3 é linear-progressiva, a partir do momento que todos os valores $u^{k+1/2}$ e $\eta^{k+1/2}$ são conhecidos a partir do primeiro meio-estágio.

O subscrito i nos coeficientes A , B , C , D e E , indica que o procedimento de solução de coluna é resolvido ao longo de cada linha por vez. Os valores são resolvidos ao longo da linha j paralela ao eixo Ox em um tempo $k + 1/2$ através de uma matriz, passando então, para linha $j+1$, onde se forma outro sistema matricial responsável pela resolução desta linha, até atingir a linha $j = m$, completando-se o tempo de análise $k+1/2$. Colocando ambas equações em uma matriz, obtemos

$$\begin{bmatrix} 1 & D_1 & & & & \\ T & A_1 & -T & & & \\ & C_2 & 1 & D_2 & & \\ & & T & A_2 & -T & \\ & & & \vdots & \vdots & \\ & & & T & A_{n-1} & -T \\ & & & & C_n & 1 & D_n \\ & & & & & T & A_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \eta_1 \\ u_1 \\ \eta_2 \\ u_2 \\ \vdots \\ u_{n-1} \\ \eta_n \\ u_n \end{bmatrix}^{k+1/2} = \begin{bmatrix} E_1 - C_1 u_0 \\ B_1 \\ E_2 \\ B_2 \\ \vdots \\ B_{n-1} \\ E_n \\ B_n + T u_{n+1} \end{bmatrix} \quad (6.3.9)$$

onde n é o número de pontos da malha na direção x , u_0 é a especificação de velocidade no contorno de jusante e u_{n+1} é a especificação de velocidade no contorno de montante da linha em estudo.

Duas características desta matriz serão essenciais para sua inversão. Primeiro é a possibilidade de $2(n-1)$ equações resolverem $2n$ variáveis. Para tanto, duas condições de contorno devem ser especificadas, uma no começo da linha de cálculo e outra ao final. A segunda característica da matriz, é a sua estrutura tridiagonal com nenhum valor nulo, que possibilita o uso do algoritmo tridiagonal de dupla varredura "double-sweep" ou Decomposição LU (PONCE *et al.*, op. cit.; ABBOTT *et. al.* OLIVEIRA DE JESUS, op. cit.) para inverter a matriz. Após a utilização desse algoritmo linha por linha tem-se os valores das variáveis $u_{i,j}$ e $\eta_{i,j}$ para a primeiro estágio do passo de tempo $k + 1/2$. Os valores $v_{i,j}$ são calculados através da equação 3.1.3.3, através da seguinte formulação desenvolvida a partir do esquema de diferenças finitas citado anteriormente (progressivo para as derivadas temporais e centrado para as derivadas espaciais):

$$v_{ij}^{k+1/2} = \frac{v_{ij}^k - \frac{1}{2}\Delta t \left[g \left(\frac{\eta_{i,j+1}^{k+1/2} - \eta_{i,j}^{k+1/2}}{\Delta y} \right) + \left(\frac{u_{ij}^{k+1/2} + u_{i,j+1}^{k+1/2} + u_{i-1,j}^{k+1/2} + u_{i-1,j+1}^{k+1/2}}{4} \right) \left(\frac{v_{i,j+1}^k - v_{i,j}^k}{2\Delta x} \right) \right]}{1 + \frac{1}{2}\Delta t \left[\left(\frac{v_{i,j+1}^k - v_{i,j}^k}{2\Delta y} \right) + \left(\frac{f_{i,j} + f_{i,j+1}}{2} \right) \left(\frac{\left(v_{ij}^k \right)^2 + \left(\frac{u_{ij}^k + u_{i,j+1}^k + u_{i-1,j}^k + u_{i-1,j+1}^k}{4} \right)^2 \right)^{1/2}}{\left(\frac{\eta_{i,j+1}^{k+1/2} + \eta_{i,j}^{k+1/2}}{2} \frac{z_{bij} + z_{bi,j+1}}{2} \right)} \right]} \quad (6.3.10)$$

completando-se a análise do tempo $k + 1/2$.

Para fazer a análise do tempo $k + 1$, procedemos de maneira similar à análise do tempo $k + 1/2$, mas resolvemos implicitamente a equação 3.1.3.1 e a equação 3.1.3.3 na direção do eixo Oy , para passarmos então à resolução explícita da equação 3.1.3.2 na direção do eixo Ox .

Para a Equação (3.1.3.3), para o tempo $k+1$:

$$T\eta_{i,j}^{k+1} + A_j v_{i,j}^{k+1} - T\eta_{i,j+1}^{k+1} = B_j \quad (6.3.11)$$

Para a equação de conservação da massa (3.1.3.1) no tempo $k + 1$:

$$C_j v_{i,j-1}^{k+1} + \eta_{i,j}^{k+1} + D_j v_{i,j}^{k+1} = E_j \quad (6.3.12)$$

onde:

$$T = -\frac{g\Delta t}{2\Delta x} \quad (4.3.3)$$

$$A_j = 1 + \frac{1}{2}\Delta t \left[\frac{1}{2}(f_{i,j} + f_{i,j+1}) \right] \left[\left(v_{i,j}^{k+1/2} \right)^2 + \left(\frac{1}{4} \left(u_{i-1,j}^{k+1/2} + u_{i-1,j+1}^{k+1/2} + u_{i,j}^{k+1/2} + u_{i,j+1}^{k+1/2} \right) \right)^2 \right]^{1/2} + \frac{v_{i,j+1}^{k+1/2} - v_{i,j-1}^{k+1/2}}{2\Delta y} \left\{ \frac{\left(\frac{\eta_{i,j+1}^{k+1/2} + \eta_{i,j}^{k+1/2}}{2} \frac{z_{bij} + z_{bi,j+1}}{2} \right)}{\left(\frac{\eta_{i,j+1}^{k+1/2} + \eta_{i,j}^{k+1/2}}{2} \frac{z_{bij} + z_{bi,j+1}}{2} \right)} \right\} \quad (6.3.13)$$

$$B_j = v_{i,j}^{k+1/2} - \frac{1}{2} \Delta t \left[\left(\frac{1}{4} (u_{i-1,j}^{k+1/2} + u_{i-1,j+1}^{k+1/2} + u_{i,j}^{k+1/2} + u_{i,j+1}^{k+1/2}) \right) \left(\frac{v_{i+1,j}^{k+1/2} + v_{i-1,j}^{k+1/2}}{2\Delta x} \right) \right] \quad (6.3.14)$$

$$C_j = -\frac{\Delta t}{4\Delta y} (\eta_{i,j}^{k+1/2} + \eta_{i,j-1}^{k+1/2} - z_{bi,j-1} - z_{bi-1,j-1}) \quad (6.3.15)$$

$$D_j = \frac{\Delta t}{4\Delta y} (\eta_{i,j+1}^{k+1/2} + \eta_{i,j}^{k+1/2} - z_{bi,j} - z_{bi-1,j}) \quad (6.3.16)$$

$$E_j = \eta_{i,j}^{k+1/2} - \frac{1}{2} \Delta t \left[\left(\frac{\frac{\eta_{i+1,j}^{k+1/2} + \eta_{i,j}^{k+1/2}}{2} - \frac{z_{bi,j} + z_{bi,j-1}}{2}}{\Delta x} \right) u_{i,j}^{k+1/2} - \left(\frac{\frac{\eta_{i,j}^{k+1/2} + \eta_{i-1,j}^{k+1/2}}{2} - \frac{z_{bi-1,j} + z_{bi-1,j-1}}{2}}{\Delta x} \right) u_{i-1,j}^{k+1/2} \right] \quad (6.3.17)$$

A natureza implícita das equações, também está na presença de três variáveis desconhecidas na formulação da equação de diferenças finitas da equação 3.1.3.1 e a equação 3.1.3.3. A linearização da equação 3.1.3.2 também é linear-progressiva, a partir do momento que todos os valores v^{k+1} e η^{k+1} são conhecidos a partir do primeiro meio-estágio.

O subscrito j nos coeficientes A , B , C , D e E , indica que um procedimento de solução de linha é resolvido por vez ao longo de cada coluna. Os valores são resolvidos ao longo da coluna i paralela ao eixo y em um tempo $k + 1$ através de uma matriz, passando então, para coluna $i+1$, onde se forma outro sistema matricial responsável pela resolução desta coluna, até atingir a coluna $i = n$, completando-se o tempo de análise $k+1$. Calculamos a matriz analogamente ao passo $k + 1/2$.

Após a utilização desse algoritmo coluna por coluna temos os valores das variáveis $v_{i,j}$ e $\eta_{i,j}$ para a primeiro estágio do passo de tempo $k + 1$. Os valores $u_{i,j}$ são calculados através da equação 3.1.3.2, através da seguinte formulação desenvolvida a partir do esquema de diferenças finitas citado anteriormente (progressivo para as derivadas temporais e centrado para as derivadas espaciais):

$$u_{ij}^{k+1} = \frac{u_{ij}^{k+1/2} - \frac{1}{2} \Delta t \left[g \left(\frac{r_{bi,j}^{k+1} - r_{bj}^{k+1}}{\Delta x} \right) + \left(\frac{v_{ij}^{k+1} + v_{i+1,j}^{k+1} + v_{i+1,j-1}^{k+1} + v_{i,j-1}^{k+1}}{4} \right) \left(\frac{u_{i+1,j}^{k+1/2} - u_{i,j-1}^{k+1/2}}{2 \Delta y} \right) \right]}{1 + \frac{1}{2} \Delta t \left[\left(\frac{u_{i+1,j}^{k+1/2} - v_{i+1,j}^{k+1/2}}{2 \Delta x} \right) + \left(\frac{f r_{ij}^{k+1} + f r_{i+1,j}}{2} \right) \left(\frac{\left(u_{ij}^{k+1/2} \right)^2 + \left(\frac{v_{ij}^{k+1/2} + v_{i+1,j}^{k+1/2} + v_{i+1,j-1}^{k+1/2} + v_{i,j-1}^{k+1/2}}{4} \right)^2 \right)^{1/2}}{\left(\frac{r_{bi,j}^{k+1} + r_{ij}^{k+1}}{2} \frac{z_{bi,j} + z_{bi,j-1}}{2} \right)} \right]} \quad (6.3.18)$$

completando-se a análise do tempo $k + 1$.

Falta agora estabelecer os contornos à montante e jusante das linhas e colunas de cálculo que são formados por valores de células externas à malha e dão partida à resolução das matrizes. Esses contornos podem ser de dois tipos possíveis: contorno aberto e contorno fechado. O contorno fechado corresponde às fronteiras água-terra, onde assume-se que na célula a velocidade é nula perpendicular ao contorno ("no-slip condition"), condição necessária, segundo FLOKSTRA (op. cit.), para haver recirculação no escoamento. O contorno aberto corresponde às fronteiras água-água, sendo fixado pela variação temporal ou do nível d'água ou da velocidade ou da vazão perpendicular à linha de contorno.

O modelo requer consistência e estabilidade. Consistência exige que a diferença entre a equação discretizada e a equação diferencial tenda a zero no limite de Δt e Δx tendendo a zero. Significa amenizar a margem de erro entre as equações diferenciais e de diferenças finitas. Estabilidade impõe que o erro não aumente com o caminhar dos pontos calculados (ao longo do processo de cálculo). WEARE e SALOMON apud OLIVEIRA DE JESUS (op. cit.), recomendam parâmetros para estabilidade do modelo, por meio da aplicação do critério de *Von Neumann* em situações simplificadas. Entretanto, se algumas vezes os valores escaparem pouco em relação a tais critérios, não afetar-se-á a estabilidade do modelo como um todo, pois tal critério é considerado muito forte^{§§§}. A seguinte relação, segundo os autores acima, garantem estabilidade ao modelo.

^{§§§}Comentário do Prof. Culminato em suas aulas da disciplina *Métodos de Resolução de Equações Diferenciais Parciais*, ministrada no PPG em Matemática no ICMSC-USP.

$$\Delta t \leq \frac{2g(\Delta x)^2}{C_h h u} \quad (6.3.19)$$

O ajuste do modelo deve ser feito pelos parâmetros de rugosidade (embutido na tensão tangencial de fundo), do vento (embutido na tensão tangencial de superfície) e do coeficiente de dissipação turbulenta (embutido na tensão efetiva), buscando comparar com dados de campo obtidos por exemplo com campanhas de flutuadores (OLIVEIRA DE JESUS, op. cit.) ou outra técnica adequada de medição de velocidades e níveis.

O modelo de transporte de massa é empregado após conhecer-se o campo de velocidades. A derivada temporal emprega um esquema progressivo no tempo e os termos de convecção um esquema puramente centrado no espaço. Já para o termo advectivo, um esquema QUICK (*Quadratic Upstream Interpolation Kinetics*) é empregado. Este não é puramente centrado, pois engloba sempre dois termos à montante do escoamento na célula estudada, supondo-se uma variação quadrática.

Apresenta-se aqui a discretização da Equação de Transporte, considerando a velocidade u da célula em questão na direção do eixo Ox no primeiro meio intervalo de tempo

Tomando-se a equação de advecção-difusão no plano bidimensional, temos:

$$\frac{\partial cH}{\partial t} + \frac{\partial cHU}{\partial x} + \frac{\partial cHV}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(HK_x \frac{\partial c}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(HK_y \frac{\partial c}{\partial y} \right) \quad (6.3.20)$$

Tomando os valores das concentrações do termo advectivo e considerando a Figura 6.7 para os desenvolvimentos posteriores, obtém-se

Figura 6.7: Esquema de interpolação QUICK

$$\frac{UHC_{i+1,j}^{n+1} + UHC_{i,j}^{n+1}}{2} - \frac{1}{8} (UHC_{i,j}^n - 2UHC_{i-1,j}^n + UHC_{i-2,j}^n) \quad (6.3.21)$$

para o valor da concentração no ponto (i,j) e

$$\frac{UHC_{i,j}^{n+1} + UHC_{i-1,j}^{n+1}}{2} - \frac{1}{8} (UHC_{i+1,j}^n - 2UHC_{i,j}^n + UHC_{i-1,j}^n) \quad (6.3.22)$$

para o valor no ponto $(i-1,j)$.

Utilizando diferenças progressivas no tempo e no espaço teremos:

$$\begin{aligned} & \frac{HC_{i,j}^{n+1/2} - HC_{i,j}^n}{\Delta t} \\ & + \frac{1}{\Delta x} \left\{ \left[\frac{UHC_{i+1,j}^{n+1/2} + UHC_{i,j}^{n+1/2}}{2} - \frac{1}{8} (UHC_{i+1,j}^n - 2UHC_{i,j}^n + UHC_{i-1,j}^n) \right] - \right. \\ & \left. \left[\frac{UHC_{i,j}^{n+1/2} + UHC_{i-1,j}^{n+1/2}}{2} - \frac{1}{8} (UHC_{i,j}^n - 2UHC_{i-1,j}^n + UHC_{i-2,j}^n) \right] \right\} \quad (6.3.23) \\ & + \frac{VHC_{i,j+1}^n - VHC_{i,j-1}^n}{2\Delta x} = \\ & \frac{HK_x}{\Delta x^2} (c_{i+1,j}^{n+1/2} - 2c_{i,j}^{n+1/2} + c_{i-1,j}^{n+1/2}) + \frac{HK_y}{\Delta x^2} (c_{i,j+1}^n - 2c_{i,j}^n + c_{i,j-1}^n) \end{aligned}$$

* Utiliza os termos de montante e jusante no tempo $n+1/2$, fazendo o termo principal e o termo de jusante e os 2 termos de montante no tempo n fazendo o termo de correção

A discretização em x envolveu as variáveis no tempo $n+1/2$, menos para os termos da correção quadrática. Já a discretização em y , utilizou as variáveis no tempo n , de maneira a conseguir uma matriz tridiagonal no final. Esse procedimento é utilizado para os cálculos das concentrações CU ao final do cálculo por linhas (realizadas no tempo $k+1/2$), e discretizado de maneira análoga para os cálculos das concentrações CV (realizados nos tempos $k+1$). As velocidades e as profundidades utilizadas são tomadas em função da média dos seus entornos em relação aonde são calculadas as concentrações, da seguinte maneira, tomando de exemplo o ponto (i,j) :

$$U = \frac{u_{i,j} + u_{i-1,j-1} + u_{i,j-1} + u_{i-1,j}}{4}, V = \frac{v_{i,j} + v_{i-1,j-1} + v_{i,j-1} + v_{i-1,j}}{4},$$

$$H = \frac{h_{i,j} + h_{i-1,j-1} + h_{i,j-1} + h_{i-1,j}}{4}$$

Agrupando-se os termos semelhantes:

$$\begin{aligned} & Hc_{i,j}^{n+1} + \frac{\Delta t}{2\Delta x} UHc_{i,j}^{n+1} - \frac{\Delta t}{2\Delta x} UHc_{i,j}^{n+1} + 2\frac{\Delta t}{\Delta x^2} HK_x c_{i,j}^{n+1} - \\ & \frac{\Delta t}{2\Delta x} UHc_{i+1,j}^{n+1} - \frac{\Delta t}{\Delta x^2} HK_x c_{i+1,j}^{n+1} - \\ & \frac{\Delta t}{2\Delta x} UHc_{i-1,j}^{n+1} - \frac{\Delta t}{\Delta x^2} HK_x c_{i-1,j}^{n+1} = \\ & Hc_{i,j}^n - \frac{1}{4} \frac{\Delta t}{\Delta x} UHc_{i,j}^n + \frac{1}{4} \frac{\Delta t}{\Delta x} UHc_{i,j}^n - 2\frac{\Delta t}{\Delta x^2} HK_y c_{i,j}^n + \\ & \frac{1}{8} \frac{\Delta t}{\Delta x} UHc_{i+1,j}^n - \frac{1}{8} \frac{\Delta t}{\Delta x} UHc_{i+1,j}^n + \\ & \frac{1}{8} \frac{\Delta t}{\Delta x} UHc_{i-1,j}^n - \frac{1}{8} \frac{\Delta t}{\Delta x} UHc_{i-1,j}^n - \frac{1}{2} \frac{\Delta t}{\Delta x} VHC_{i,j+1}^n + \frac{\Delta t}{\Delta x^2} HK_y c_{i,j+1}^n + \\ & \frac{1}{2} \frac{\Delta t}{\Delta x} VHC_{i,j-1}^n + \frac{\Delta t}{\Delta x^2} HK_y c_{i,j-1}^n \end{aligned} \quad (6.3.24)$$

Perceba que nas três primeiras linhas, encontramos coeficientes envolvendo todos os valores desconhecidos, e nas restantes, coeficientes multiplicadores das concentrações já conhecidas.

Rescrevendo, chegamos na seguinte equação:

$$\begin{aligned}
& \left(UH \frac{\Delta t}{2\Delta x} - \frac{HK_x \Delta t}{\Delta x^2} \right) c_{i+1,j}^{n+1} + \left(H + \frac{2HK_x \Delta t}{\Delta x^2} \right) c_{i,j}^{n+1} \\
& + \left(-UH \frac{\Delta t}{2\Delta x} - \frac{HK_x \Delta t}{\Delta x^2} \right) c_{i-1,j}^{n+1} = \\
& \left(H - \frac{2HK_y \Delta t}{\Delta x^2} \right) c_{i,j}^n + \left(-\frac{1}{2}VH \frac{\Delta t}{\Delta x} + \frac{HK_y \Delta t}{\Delta x^2} \right) c_{i,j+1}^n \\
& + \left(\frac{1}{2}VH \frac{\Delta t}{\Delta x} + \frac{HK_y \Delta t}{\Delta x^2} \right) c_{i,j-1}^n
\end{aligned} \quad (6.3.25)$$

Esta equação forma um sistema tridiagonal do tipo:

$$M_{i,j} c_{i+1,j}^{n+1/2} + N_{i,j} c_{i,j}^{n+1/2} + O_{i,j} c_{i-1,j}^{n+1/2} = P_{i,j} \quad (6.3.26)$$

Os valores das concentrações no contorno fornecem os valores finais para o cálculo dentro do domínio. O algoritmo utilizado é para uma velocidade do eixo Ox . O termo de correção sempre envolverá as variáveis nos pontos à montante e no intervalo de tempo anterior.

Quanto aos contornos, eles podem ser de três tipos:

- fechado, onde assume o valor zero;
- aberto concentração, como um emissário em funcionamento sempre alimentando com massa o sistema;
- aberto gradiente zero de concentração, locais de saída e entrada de água do reservatório que não lançam o constituinte na represa. Representam a saída de massa do sistema.

LEONARD (*op. cit.*) e BORCHE (*op. cit.*) adotam como critério de estabilidade, a seguinte relação

$$Pe = \frac{U\Delta x}{D} < 2 \quad (6.3.27)$$

sendo Pe o número de Peclet, a relação entre o “poder” advectivo e difusivo.

Por fim, é importante destacar que o modelo de transporte pode-se utilizar de um escoamento permanente para ser desenrolado, bem como ser rodado junto ao modelo de circulação. Ou seja, podemos definir uma situação inicial pretendida, que irá manter o campo

de velocidades constante durante toda a simulação, ou ainda, ter o cálculo do campo de velocidades num determinado tempo e em seguida, o cálculo do transporte para esse mesmo tempo, procedendo assim para o passo seguinte com o cálculo hidrodinâmico num tempo posterior seguido novamente do cálculo da dispersão.

6.4 O MODELO APLICADO AO RESERVATÓRIO BILLINGS.

As profundidades para uso no modelo foram inseridas de acordo com as plantas topobatimétricas EBC-001 a EBC-068 fornecidas pelo Departamento de Operação e Hidrometeorologia da EMAE. Tal levantamento havia sido realizado em 1986, sendo que parte das curvas estava já em base digital e outra parte ainda nas cartas-mapa. Vale mencionar que a inserção desses dados foi muito trabalhosa e contou com ajuda do pessoal do Departamento de Sensoriamento Remoto do INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais) e do pessoal do IPH da UFRGS. A inserção "manual" da batimetria que não estava em base digital foi a etapa mais desgastante do processo, uma vez que implicou em operação "mecânica" prolongada, sem obtenção de avanços no tocante à simulação propriamente dita. A Figura 6.9 mostra de forma geral o resultado da digitação da batimetria. Deve-se aqui salientar que a parte objeto deste estudo é relativa ao compartimento de Pedreira, mostrado na Figura 6.8, e o nível de referência, de acordo com os dados da EMAE, é de 741.00 m.

Devido à ausência de extensas áreas alagáveis ou submersíveis, o modelo apresenta um tamanho único, contendo 5.442 células. O incremento espacial utilizado foi $\Delta x = \Delta y = 200\text{m}$. O intervalo de tempo Δt foi tomado igual a 1 min para facilitar a visualização do tempo (já que uma saída gráfica permite a visualização dos resultados concomitante ao cálculo) e atender os parâmetros de estabilidade da equação hidrodinâmica.

Figura 6.8: Contorno do reservatório adotado no modelo

Figura 6.9: Batimetria utilizada no modelo. Dados no quadro de valores em metros (m).

Algumas considerações sobre os dados utilizados nas simulações.

- Vazões bombeadas em Pedreira: é a principal entrada de água das simulações. Consiste dos dados de vazões fornecidos pela EMAE referentes aos anos de 1994 e 1995. Tais vazões, como todas as outras são inseridas no modelo através das velocidades, da seguinte maneira

$$Q = U\Delta xh \quad (6.4.1)$$

onde Q é a vazão de entrada

Como tais dados são as vazões médias em cada dia, são considerados constantes durante cada dia da simulação.

- Vazões descarregadas no SUMMIT-CONTROL: é a única saída de água do reservatório. Provém dos mesmos dados fornecidos pela EMAE.
- Níveis em Pedreira: Faz parte do mesmo grupo de dados mencionados acima e consiste da medição do nível do reservatório às 24 hs de cada dia. São utilizados para ajustar as vazões naturais do sistema.
- Vazões Naturais: São estimadas com outros dados fornecidos pela EMAE, juntamente com um estudo realizado pela CETESB - *Estudo da Represa Billings. Caracterização Sanitária e Ecológica para Avaliação de Suas Águas* (1979). Nesse documento há uma estimativa da vazão de base dos principais afluentes do reservatório: Na margem esquerda são os Rios Bororé, Colônia, Vermelho, Campestre, Curucutu A e B e Pequeno. Na margem direita: Ribeirão dos Apuros, Guacuri e Rio dos Alvarenga. Naquels primeiros dados, encontramos os dados pluviométricos diários dos anos de 1994 e 1995 dos Postos do DNAEE (Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica) P-12-042 Pedreira, P-12-035 Barragem do Córrego Preto e P-12-041 Sangradouro do Pequeno Perequê próximos aos cursos d'água, juntamente com as áreas da bacia do reservatório que os compreendem. Os procedimentos da estimativa foram os seguintes, visando evitar bruscas variações de vazão de entrada das águas naturais do reservatório.

1. Cálculo do Volume Chovido na Bacia em cada dia - $Vol = I * A$, sendo I a precipitação diária no posto pluviométrico próximo à bacia e A , a área da bacia contribuinte ao afluente.
2. Variação Parabólica das Vazões Chovidas. É considerada a vazão de chuva como o volume total chovido em 24 horas. O seguinte raciocínio foi utilizado

Admitiu-se um perfil parabólico para a vazão em função do tempo

$$Q = at^2 + bt$$

Tem-se em $t=0$ e $t=86400$ s vazões de chuva igual a zero. A vazão máxima ocorre (por imposição da simplificação) ao meio dia, $t=43200$ s.

Então tem-se o seguinte diagrama (O gráfico abaixo considera um Volume chovido de 86.400 m^3)

Figura 6.10: Gráfico da aproximação de vazões naturais

O ponto de máximo, correspondente à derivada primeira igual a zero, no ponto $t=43.200 \text{ seg.}$

Então, $\frac{dQ}{dt} = 2at + b$ (6.4.2)

e $2at + b = 0 \rightarrow a = -\frac{b}{86400}$ (6.4.3)

A área compreendida entre a curva do gráfico e o eixo do tempo (Ox), representa o volume chovido V e é calculado pela integral de Qdt

$$\begin{aligned}
 V &= \int_0^{86400} Qdt = \int_0^{86400} at^2 + btdt \rightarrow \\
 V &= \left[\frac{at^3}{3} + \frac{bt^2}{2} \right]_0^{86400} = \left[\frac{at^3}{3} + \frac{bt^2}{2} \right]_0^{86400} \rightarrow \\
 V &= 86400^2 \frac{b}{6} \rightarrow b = \frac{6V}{86400^2} \quad (6.4.4) \\
 \therefore a &= -\frac{6V}{86400^3} \\
 \therefore Q &= -\frac{6V}{86400^3} t^2 + \frac{6V}{86400^2} t
 \end{aligned}$$

3. Para a entrada de dados no programa, são calculados os coeficientes a e b para cada dia, de maneira a obter a equação e o posterior cálculo do valor da vazão a cada 60 seg., que é o Δt a ser empregado no modelo.
4. Os valores resultantes do passo acima são multiplicados por um *coeficiente de run-off* (nem toda a vazão chovida se dirigirá ao escoamento superficial) e somado ao escoamento básico, obtendo valores para cada minuto de simulação a serem inseridos nas simulações.

- Os dados de ventos foram fornecidos pela EMAE, e fazem parte de uma série histórica referente ao período de 1938 a 1988. Os dados são referentes às direções predominantes de vento e sua intensidade em cada mês. Segundo informação pessoal do geógrafo Eduardo Rocha, da Seção de Meio Ambiente da EMAE, os ventos sopram desde o início da tarde até o início da noite. Quando da utilização de dados reais (testes do *coeficiente de "run-off"* e testes do *tempo de residência*), foi admitida uma variação linear do vento no período de 14:00 hs às 20:00 hs de cada dia, com intensidade máxima de

velocidades às 17:00 hs.(velocidade crescente até esta hora e decrescente após ela), de maneira a obter-se o valor médio no dia igual à intensidade fornecida.

- Demais dados, como o coeficiente de *Chézy*, o coeficiente de atrito do vento e o coeficiente de dissipação turbulenta fazem parte da análise de sensibilidade do modelo sendo que os valores intermediários dos parâmetros são comumente utilizados para outras modelagens. Tal escolha de valores se deve à falta de dados de campo para aferição do modelo.
- O coeficiente de dispersão no modelo de transporte de massa foi escolhido de maneira a satisfazer o número de *Péclet* mínimo. Para o caso real, seriam necessárias medições efetuadas em campo. No presente trabalho foi utilizado os valores $K_x=K_y=5.0 \text{ m}^2/\text{s}$.

7 TESTES DO MODELO DE CIRCULAÇÃO

Antes das simulações em si, com dados reais, foram feitos testes de sensibilidade da influência dos diversos parâmetros. Foi considerado um escoamento permanente, passível de acontecer da seguinte maneira.

- *Nível Inicial em todo o domínio – 1.50 m*
- *Vazão em Pedreira – 20 m³/s*
- *Vazão no Summit Control – 32 m³/s*
- *Vazão no Rio Bororé – 0.038 m³/s*
- *Vazão no Rio Colônia – 0.008 m³/s*
- *Vazão no Rio Vermelho – 0.047 m³/s*
- *Vazão no Rio Campestre – 0.029 m³/s*
- *Vazão no Rio Curucutu A – 0.061 m³/s*
- *Vazão no Rio Curucutu B – 0.025 m³/s*
- *Vazão no Rio Pequeno – 0.059 m³/s*
- *Vazão no Rio dos Alvarenga – 0.023 m³/s*
- *Vazão no Ribeirão dos Apuros – 0.011 m³/s*
- *Vazão no Ribeirão Guacuri – 0.009 m³/s*

Coefficiente de Chézy - três rodadas de testes, com $C_h = 1.0, 50.0$ e 100.0

Coefficiente de Viscosidade Turbulenta - três rodadas de testes, com $\nu_t = 1.0, 10.0$ e $50.0 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$

Constante de Atrito do Vento - três rodadas de testes, com $C_w = 3.0 \times 10^{-6}, 3.0 \times 10^{-9}$ e 3.0×10^{-4} .

Os valores centrais dos parâmetros de ajuste acima são de ordem de grandeza de casos reais e foram sugeridos por BORCHE (1996). Uma partida fria foi a condição inicial das simulações que foram programadas para 5000 iterações. Ventos de 9.0 Km/h NW e SW foram considerados durante toda simulação para os testes de sensibilidade de ventos.

O teste seguinte foi empregado para ajustar o “coeficiente de run-off” das vazões naturais. O modelo foi rodado até obter o melhor ajuste de níveis em período seco (agosto, 1994) e posterior verificação do comportamento em período chuvoso (março, 1995) já adotando uma variação de ventos no decorrer de cada dia.

O último teste foi para estimar o *tempo de residência* do reservatório. Foi utilizado o modelo de transporte, inserindo uma massa grande de “poluente” na entrada d’água em Pedreira com acompanhamento da mancha até a saída de seu epicentro no Summit-Control. Igualmente foi acompanhada a evolução de níveis no reservatório. O teste utilizou os dados “reais” do período de 01/10/94 a 01/10/95.

8 RESULTADOS

Os testes de sensibilidade mostraram que o modelo adotado aponta os ventos como os principais modificadores do padrão de escoamento no reservatório de Billings. De uma maneira geral, o comportamento foi o seguinte

Coefficiente de Chézy – O escoamento manteve um padrão de velocidades baixas semelhantes para todos os casos experimentados para o coeficiente de Chézy, sem vórtices, exceto na região próxima à Barragem de Pedreira, e direcionadas no sentido Pedreira-Summit Control (Figura 8.2). Uma variação espacial de níveis superior ocorreu para o caso do coeficiente de menor valor ($Ch=1.0$), devido ao forte cisalhamento, como pode ser visto na Figura 8.1, chegando à 3,0 cm entre os pontos próximos à Pedreira e ao Summit. O nível médio no caso da Figura 8.1 é de 1.488 m. Nos outros testes a diferença de níveis máxima foi de 1 mm para o mesmo período, assumindo os valores de 1.487 e 1.488 m..

A Figura 8.2 apresenta o padrão de circulação encontrado no teste de Coeficiente de Chézy igual a 1.0 após 24 horas. O mesmo padrão de velocidades se repetiu para os dois outros testes do Coeficiente com variações no módulo de velocidades em relação a este teste de até 0.002 m/s maiores, no caso das quadrículas que incorporam velocidades mais altas. A Figura 8.3 aponta o módulo de velocidades em cada quadrícula para o caso de $Ch=1.0$. Há regiões de velocidade praticamente nula, como nos braços do reservatório e em toda região branca dessa figura com velocidades chegando a uma intensidade de até 0.001 m/s. Contraposto a isso, encontramos regiões de velocidades mais altas, principalmente nos estrangulamentos sob a via Imigrantes e a 3 Km antes de chegar ao Summit-Control. Também são encontradas altas velocidades na entrada d'água em Pedreira e na saída no Summit-Control. As maiores velocidades, como já era de se esperar foram próximas ao bombeamento em Pedreira chegando a 0.025 m/s, diminuindo gradativamente ao adentrar o reservatório. Já nos estrangulamentos mencionados, encontramos um módulo de 0.024 m/s a

Summit- Control e de 0.013 m/s sob a rodovia dos Imigrantes. As águas chegam ao Summit-Control com velocidades de 0.019 m/s. As regiões em rosa na Figura 8.3 representam velocidades de módulo igual a 0.003 m/s.

Constante de Viscosidade Turbulenta - O escoamento manteve um padrão de velocidades baixas semelhantes para todos os casos estudados para a viscosidade turbulenta, sem vórtices, exceto na região próxima à Barragem de Pedreira, e direcionadas no sentido Pedreira-Summit Control. Uma pequena oscilação espacial de níveis dentro do reservatório, no caso, de até 2 mm, ocorreu para o caso do coeficiente de maior valor ($\nu_t = 50.0 \text{ m}^2/\text{s}$), como mostra a Figura 8.4. Para o caso de coeficiente de menor valor, essa oscilação espacial de níveis foi imperceptível ($\nu_t = 1.0 \text{ m}^2/\text{s}$). As velocidades tiveram resultados quase idênticos entre os dois menores valores ($\nu_t = 1.0 \text{ m}^2/\text{s}$ e $10 \text{ m}^2/\text{s}$), com diferenças de módulo de até 0.001 m/s, sendo a mais gritante no estrangulamento sob a rodovia dos Imigrantes. O valor da velocidade nesse local é de 0.012 m/s para o menor valor do coeficiente e 0.013 m/s para o valor intermediário do coeficiente. Já o maior valor do coeficiente apresentou velocidades bem maiores. Para a quadricula localizada sob a via Imigrantes examinada acima, obteve um valor de 0.020 m/s, bem acima dos outros. Já no estrangulamento a 3 km do Summit-Control, as velocidades chegaram a superar os valores obtidos nas proximidades da barragem de Pedreira, com um módulo de 0.032 m/s.

Constante de Cisalhamento do Vento - Verificou-se que se manteve, no escoamento, um padrão de velocidades baixas. Porém deu-se início à formação de vórtices (Figura 8.7), ainda que localizados e pequenos e uma conformação diferente daquelas anteriormente apresentadas para a oscilação espacial de níveis no reservatório. Os maiores níveis ocorreram junto às "paredes" opostas à direção do vento e aumentaram ao longo da direção do vento. Aumentando-se a constante de cisalhamento do vento, e portanto, a influência do mesmo, houve um acentuado aumento do módulo de velocidades (compare as Figuras 8.3 e 8.5) e quantidade de vórtices. Quando se utilizou o valor mais baixo da constante de cisalhamento do vento, produziu-se o mesmo efeito no escoamento observado quando da ausência de ventos. Já para o maior valor do coeficiente de atrito do vento, o modelo sugere que os ventos chegam a provocar uma explosão dos módulos de velocidades de natureza instável, podendo ser observado na Figura 8.6. Verificou-se ainda que um aumento do módulo das velocidades dos ventos pode causar situações semelhantes. Ou seja, tanto o aumento do coeficiente de cisalhamento do vento como do valor da velocidade do mesmo induz a respostas semelhantes no modelo. Tomando-se o caso do coeficiente de cisalhamento do

vento de $3,5 \times 10^{-6}$, nas regiões marcadas por módulo de velocidades altas analisadas nos casos anteriores, o módulo das velocidades praticamente não se alterou (caso da entrada em Pedreira, saída no Summit-Control e estrangulamentos sob a rodovia dos Imigrantes e a três quilômetros à montante do Summit-Control). Um aumento sensível do módulo de velocidades no Braço do Taquacetuba e no Corpo Central da represa pode ser notado. A recirculação gerada no referido braço é muito importante na manutenção da qualidade de água superior no local em relação ao Corpo Central do reservatório, pois essa conformação comporta-se como uma barreira para a entrada de constituintes. Para esse caso, os módulos das velocidades chegaram a 0,017m/s próximo à margem direita do braço. Ainda no braço, é possível notar dois vórtices, sendo que o maior apresenta módulos de velocidades variando de 0,002m/s até 0,004m/s e o menor de 0,000m/s até 0,003m/s. Ainda assim, o padrão de escoamento principal permaneceu no sentido Pedreira-Summit. Para o caso dos níveis, obtivemos valores de 1,485m nas proximidades da barragem de Pedreira, aumentando gradualmente até o valor de 1,490m no braço do Rio Pequeno. Já no caso do coeficiente de cisalhamento do vento de $3,5 \times 10^{-4}$, os módulos de velocidades no domínio chegaram a atingir valores superiores a 0,350m/s, denotando uma incompatibilidade à valores normalmente encontrados para reservatórios. Quanto à oscilação espacial de níveis, estas obtiveram os maiores valores apresentados, fazendo com que as águas se empilhem na margem oposta à direção do vento como pode ser notado na Figura 8.9. Apesar desse teste ter apresentado uma variação extremamente exagerada, ele exemplifica os efeitos do vento na circulação abordados no Capítulo 4. Os valores de níveis obtidos variaram de 1,235m próximo à Barragem de Pedreira a 1,752m no outro extremo do reservatório onde aflui o Rio Pequeno.

Alteração da Direção do Vento – O vento foi alterado para soprar em direção oposta ao caso anteriormente descrito. Em relação aos resultados anteriores, verificou-se que os maiores níveis ocorreram novamente junto às paredes do reservatório, crescendo na direção do vento, portanto com uma conformação contrária à do teste anterior. Os vórtices mudaram o sentido de giro, ou seja, onde este apresentava sentido horário tornou-se anti-horário e vice-versa (compare as Figuras 8.7 e 8.12). O módulo das velocidades na entrada em Pedreira, na saída no Summit-Control, no estrangulamento sob a rodovia dos Imigrantes e no estrangulamento a 3 Km à montante do Summit-Control apresentaram, respectivamente, valores de 0,025m/s, 0,019m/s, 0,012m/s e 0,024m/s, muito semelhantes aos valores encontrados para o vento na direção oposta. Fazendo a análise para os vórtices formados no braço do Taquacetuba, nas proximidades da margem direita encontramos valores um pouco superiores dos módulos de

velocidades, no caso de 0.018m/s, mas com direção contrária em relação ao teste anterior que utilizava o vento na direção noroeste. Os valores no vórtice maior ficaram variando de 0.003m/s a 0.005m/s, também em direção contrária, bem como no caso do vórtice menor, onde os módulos de velocidade variaram de 0.000m/s até 0.003m/s. Já no caso de níveis, obtivemos valores de 1.491m próximos à barragem de Pedreira caindo gradualmente até 1.485m no braço do rio Pequeno, mostrando uma conformação contrária ao caso dos ventos descrito anteriormente.

Ajuste do coeficiente de "run-off" – A idéia de utilizar esse artifício para ajustar a entrada de massa d'água do reservatório funcionou adequadamente para os períodos seco e chuvoso, apesar de sua simplicidade. O valor do parâmetro que obteve os melhores ajustes foi 0.59.

Nas Figuras 8.10 e 8.11 são apresentadas as evoluções de níveis junto à Barragem de Pedreira, nos meses de agosto de 1994 e março de 1995, respectivamente. Note-se que o ajuste do coeficiente permitiu reproduzir bem o comportamento dos níveis observados.

Estimativa do tempo de residência – De acordo com o modelo e o período estudado, o tempo de residência no reservatório de Billings foi de 134 dias (ver Figuras 8.13 e 8.14). Note-se que neste período as operações de bombeamento foram conhecidas e que o tempo de residência depende desta operação. O resultado aqui obtido está de acordo com resultados experimentais da CETESB e HIDROPLAN, que por meio de um estudo realizado em 1976 com traçador trítio, constataram um tempo de residência entre 20 e 200 dias de acordo com as operações de bombeamento e níveis de operação do reservatório. A massa que evadiu do reservatório para os cálculos efetuados corresponde a 57.2% da massa injetada em Pedreira. A concentração de entrada que foi estabelecida em 1.0×10^4 u.c. (correspondendo à massa de 3920000000.0 u.m. concentrada na célula). A mesma foi diluída a uma concentração de cerca 4.2 u.c. na saída do reservatório. A Figura 8.13 ilustra a distribuição da massa injetada quando o pico de concentração passou pela saída do reservatório. Note-se que há acúmulo de massa em braços do reservatório, o que confere à curva de concentrações uma característica de "cauda" longa. Prosseguida essa simulação, ao final do período de um ano estudado, constatou-se que 60.2% da massa inicial evadiu o reservatório, o equivalente a um total de 1559415000 u.m. ainda presentes no reservatório.

Figura 8.1: Níveis no reservatório na simulação com $Ch=1.0$ após 24 h. Valores representam o nível do reservatório em metros(m).

Figura 8.2: Padrão de escoamento encontrado na simulação com $Ch=1.0$ após 24 horas.

Figura 8.3: Módulo das velocidades para a simulação com Chézy =1.0 após 24 horas. Valores no quadro em metros por segundo (m/s)

Figura 8.4: Níveis no reservatório na simulação com $v_f=50.0 \text{ m}^2/\text{s}$ após 24 h. Valores no quadro representam o nível do reservatório em metros (m).

Figura 8.5: Módulo das velocidades para a simulação com $C_w = 3.5 \times 10^{-6}$ após 24 horas. Valores no quadro em metros por segundo (m/s)

Figura 8.6: Módulo das velocidades para a simulação com $C_w = 3.5 \times 10^{-4}$ após 24 horas. Valores no quadro em metros por segundo (m/s)

Figura 8.7: Padrão de escoamento encontrado na simulação com $C_w = 3.5 \times 10^6$ após 24 hs.

Figura 8.8: Padrão de escoamento com escala 32 x menor que a Figura 8.7 para simulação com $C_v=3.5 \times 10^{-4}$.

Figura 8.9: : Níveis no reservatório na simulação com $C_w = 3.5 \times 10^{-4}$, após 24 h. Valores no quadro representam o nível do reservatório em metros (m). A Figura evidencia o “empilhamento” d’água contra as paredes na direção do vento.

Figura 8.10: Comparação de valores de níveis calculados e observados em agosto de 1994

Figura 8.11: Comparação de valores de níveis calculados e observados em março de 1995.

Figura 8.12: Padrão de escoamento para simulação com vento na direção contrária SW com $C_w = 3.5 \times 10^{-6}$.

Figura 8.13: Configuração da mancha no momento em que o pico de concentração passa pela saída do reservatório – 10 minutos do dia 11/02/95

Variação da concentração em função do tempo no Summit-Control
(Valor de pico assinalado no $t = 133$ dias)

Figura 8.14: Evolução das concentrações na saída do reservatório no período de outubro de 1994 a setembro de 1995

9 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Apesar da simplicidade do modelo em relação ao estado da arte da modelagem hidrodinâmica, vários aspectos precisam ser levados em consideração no que tange à análise efetuada sobre o reservatório de Billings.

1. *Falta de dados para aferição do modelo* – Diversas campanhas de monitoramento da qualidade da água do reservatório foram realizadas nas últimas três décadas. Porém, não foram apresentados ou encontrados quaisquer tipos de dados referentes ao escoamento do reservatório, muito menos uma coleta de dados adequada para a aferição do modelo. É evidente que tal coleta de dados é cara, do ponto de vista financeiro, mas é indispensável ao ajuste e conseqüente previsão do funcionamento de Billings. Segundo informações pessoais, o interesse das instituições envolvidas com o reservatório (SABESP e EMAE) era grande, porém nenhuma delas teve possibilidades (historicamente) de captar recursos para tal finalidade.
2. *Batimetria antiga* – A carta batimétrica do reservatório disponível era do ano de 1986, ou seja, a quase 15 anos. Como a entrada de sedimentos por bombeamento continuou por cerca de dez anos, algumas mudanças podem ter ocorrido.
3. *Dados de vento* – Apesar de serem dados referentes a uma série histórica bem grande, sua variação temporal não foi obtida, necessitando recorrer a uma aproximação grosseira de sua evolução, baseada em informações pessoais (essas, sem dúvida, de grande valia).
4. *Estratificação não permanente* – Segundo CALIJURI et. al. (1996), o reservatório apresenta-se estratificado apenas nas horas mais quentes do dia, praticamente desaparecendo tal aspecto nos meses de inverno. Os ventos provindos das massas de ar do Oceano Atlântico proporcionam eficiente mistura das águas diminuindo tal processo.

O acima exposto novamente aponta para aquilo já afirmado no início do presente texto acerca da opção pela escolha do modelo numérico relativamente simples. Não é interessante a escolha de um modelo mais complexo, se não podemos ter certeza se este funcionará adequadamente. A necessidade da obtenção de base de dados mais recentes e compatíveis com a aferição de um possível modelo mais detalhado, juntamente com o fato de haver mistura das águas durante grande parte do tempo justificam a alternativa utilizada. Segundo CALIJURI et. al. (1996) a estratificação térmica do reservatório acontece apenas nas horas mais quentes do dia, sem ocorrência de estratificação pronunciada nos meses de inverno. A ação das massas de ar provenientes do Oceano colaboram para a mistura constante das águas da represa.

Após as primeiras observações acima, vamos às discussões dos resultados. Os valores dos parâmetros utilizados, por serem comuns na prática, devem estabelecer para o modelo do reservatório Billings um padrão de escoamento semelhante ao real. Fica muito evidente que devemos efetuar medições dos ventos para realizar um ajuste adequado do modelo. Os ventos determinam o padrão de recirculação a ser obtido no reservatório. O comportamento dos resultados frente às variações dos parâmetros anemométricos mostra a grande importância destes. As Figuras 8.4 a 8.7 caracterizam bem essa necessidade. Quanto aos outros parâmetros, verifica-se que os mesmos representam o que se pode denominar de “ajuste fino” deste modelo.

Os resultados obtidos, tanto com os dados hipotéticos como com dados reais, permitem diversas conclusões a respeito da dinâmica de larga escala do reservatório. Em todas as simulações, com ou sem ausência de ventos, o escoamento principal ocorreu no sentido Pedreira – Summit-Control devido ao funcionamento da estação elevatória situada nessa barragem. Na ausência de referido bombeamento de água, o escoamento principal ocorreu no sentido do Braço do Taquacetuba – Summit-Control. O primeiro caso pode ser constatado nas Figuras 8.2, 8.4 e 8.7 e deve às altíssimas vazões bombeadas em Pedreira e, o segundo, em virtude da maior parte da vazão natural estar concentrada no braço referido e pode ser ilustrado na Figura 8.5.

Utilizando dados reais para a simulação, juntamente com a variação de ventos, nota-se que, conforme o bombeamento em Pedreira é interrompido e os ventos cessam, o reservatório passa a se comportar como uma “piscina”. Em outras palavras, as águas ficam

praticamente em repouso, com movimentos de recirculação ausentes. Isso sustenta a hipótese de que as águas das vazões naturais não injetam quantidade de movimento considerável ao reservatório Billings, apesar de serem imprescindíveis para manutenção da massa global do sistema (variação de níveis). A Figura 9.1 elucida o comentado. Adiante são apresentados outros aspectos que levam a tal conclusão.

Figura 9.1: Reservatório com fluxos nas direções Taquacetuba – Summit-Control e Pequeno-Summit-Control na ausência de ventos e bombeamento em Pedreira.

Outro fato interessante é a ocorrência de um estrangulamento próximo à passagem sob a Rodovia dos Imigrantes, que causa o aumento da velocidades das águas no local, bem como alta turbulência associada. Esses resultados estão em conformidade com os relatos de ALMEIDA ROCHA (1984)^{****}, que ressalta o aumento da turbulência na região, promovendo uma maior mistura das águas. Um ponto de coleta de dados em tal local é adequado para o ajuste do modelo.

^{****} ALMEIDA ROCHA, A.(1984). *Ecologia, os aspectos sanitários e de saúde pública da represa Billings na região metropolitana de São Paulo, uma contribuição a sua recuperação* São Paulo. 166 p. Tese (Livre Docência) – Faculdade de Saúde Pública, Universidade de São Paulo.

Como já mencionado, as vazões naturais parecem não intervir de forma relevante no padrão de escoamento, porém são importantes para a conservação da massa como um todo. A obtenção de resultados satisfatórios para a evolução dos níveis só foi possível com a implementação do algoritmo de variação de vazões, que conseguiu incorporar não só o escoamento básico, bem como a vazão oriunda das chuvas. O seu funcionamento foi bastante eficiente no ajuste mensal, mas como podemos observar na Figura 9.2 abaixo, o gráfico apresentou pontos divergentes na simulação do ano de 1995. Um estudo localizado desses rios de pequenas bacias é interessante para uma melhor representação de tais vazões. Não são estudos caros e podem envolver pesquisadores em formação. SILVEIRA & TUCCI et. al. propõe uma metodologia bastante razoável em relação aos custos necessários^{tttt}. A existência de postos pluviométricos na região favorece essa implementação de pesquisa de campo. O conhecimento detalhado das vazões permite, também, desenvolver cenários futuros de operações de bombeamento na represa levando-se em conta esses resultados possíveis das vazões naturais.

Figura 9.2: Comparação dos valores calculados e observados durante o período estudado.

^{tttt} SILVEIRA, G. L.; TUCCI, C. E. M.; SILVEIRA, A. L. L. (1998). Quantificação de Vazão em pequenas Bacias sem Dados. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 3, n. 3, p. 111-31, Jul./Set.

O único teste no qual se incorporou o modelo de transporte de constituintes foi aquele executado para fazer a estimativa do tempo de residência. Este teste também foi o que trouxe os resultados mais consistentes. Convém destacar que esta era uma etapa não prevista no início dos trabalhos, que pretendiam incorporar apenas o estudo hidrodinâmico pelo modelo de circulação. A estimativa do tempo de residência seria obtida através de uma rotina contida no programa IPH-A, que possibilita acompanhar a trajetória de um flutuador lançado em qualquer lugar do domínio espacial. Os testes com a simulação de flutuadores falharam pelos seguintes motivos: junto à barragem de Pedreira, à nordeste, configurou-se uma zona morta, pois a recirculação promovida pelo vento impedia o progresso do flutuador, que repetia a mesma trajetória circular próxima ao local de lançamento. A idéia de retirar os ventos para estimar a residência também não obteve sucesso, pois devido à região de estrangulamento mencionada anteriormente, o flutuador se dirigia constantemente até a margem da represa. Desta forma, a incorporação do modelo de transporte se tornou a alternativa mais adequada para avaliar o tempo de trânsito de algum constituinte passivo e conservativo. O programa que permitia o uso da equação de advecção-difusão já estava pronto e em interface com o modelo de circulação.

A simulação escolhida foi realizada com os dados do período compreendido entre 0 horas do dia 01 de outubro de 1994 e 0 horas do dia 01 de outubro de 1995, de maneira que incorporasse apenas um comportamento anual. A quantidade de dados de entrada foi grande, o que conduziu a um procedimento para certificar que eles fossem incorporados de maneira adequada. O volume de dados chegou a um número razoável. Para cada minuto de simulação foi necessário entrar com a velocidade do vento nas duas direções cartesianas, as vazões bombeadas e descarregadas em Pedreira e Summit-Control e todas as vazões naturais com suas respectivas variações, de maneira que se obtivesse 14 dados por intervalo de tempo de simulação. Portanto, para completar a simulação foi necessário utilizar 7.358.400 dados de entrada, com um arquivo de mais de 20 Mb. Nesses dados consta que em Pedreira, em virtude das regras operativas legais, a maior parte do tempo não houve funcionamento (bombeamento). No período estudado, apenas 90 dos 365 dias do ano envolveram as operações de bombeamento. O período de sua maior intensidade foi o mesmo da época de chuvas, com ênfase para o mês de fevereiro. Já entre os meses de agosto e setembro houve apenas um dia de operação da elevatória em Pedreira. Podemos caracterizar as operações em Pedreira da seguinte maneira:

Outubro 1994 – Operação reduzida, 2 dias em 31

Novembro 1994 – Operação reduzida, 7 dias em 30

Dezembro 1994 – Operação pronunciada, 13 dias em 31

Janeiro 1995 – Operação pronunciada, 17 dias em 31

Fevereiro 1995 – Operação bem pronunciada, 22 dias em 28

Março 1995 – Operação pronunciada, 14 dias em 31

Abril 1995 – Operação reduzida, 6 dias em 31

Mai 1995 – Operação reduzida, 3 dias em 31

Junho 1995 – Operação reduzida, 1 dia em 31

Julho 1995 – Operação reduzida, 3 dias em 31

Agosto 1995 – Operação nula

Setembro 1995 – Operação reduzida, 1 dia em 31

Como visto em CETESB, 1979, a operação de bombeamento é que determina o tempo de residência e o movimento no reservatório. Ou seja, para conseguir reduzir o trânsito ao máximo, na intenção de manter o constituinte durante o menor tempo possível na represa, deve-se operar a estação elevatória em Pedreira. Se pensarmos no caso de um poluente, seria certo manter a operação de bombeamento sempre atuante. Em contrapartida, o maior aporte de contaminantes se dá através da referida operação, que aduz as águas do sistema Tietê-Pinheiros, uma das bacias mais poluídas em todo o mundo. A seguinte conclusão é verdadeira, e já é de ciência de autoridades e pesquisadores: É impossível a recuperação da Represa Billings sem o tratamento dos efluentes lançados nos Rios Tietê e Pinheiros. Apenas com esta recuperação é que podemos pensar em dias melhores para o Sistema Billings.

Voltando a discutir o teste realizado, a movimentação da mancha em direção ao Summit-Control foi acentuada nos meses de Dezembro a Março, quando o movimento

advectivo dominou a característica do transporte em função do *momentum* injetado nas operações de bombeamento e pelo aumento das vazões dos rios e córregos em consequência de chuvas. Nos outros meses, o processo difusivo foi mais intenso, fazendo com que a mancha se diluísse sem praticamente movimentar-se. No início da simulação também se observa um espalhamento promovido pelo grande gradiente de concentração, o que já era esperado. Conforme tal gradiente diminui, a capacidade difusiva também foi se extinguindo. Nota-se que a frente da mancha atinge o estrangulamento sob a Rodovia dos Imigrantes em 25 dias. Nesta fase, o transporte advectivo é comandado pela ação do vento e descarregamento na Barragem Reguladora Billings-Pedras (Summit-Control). Nota-se que as maiores concentrações na mancha não se afastam da Barragem de Pedreira. Somente após a primeira quinzena de novembro conseguimos perceber um caminhar da mancha como um todo. Tal comportamento se deve à quase total ausência do bombeamento nesta fase. Mesmo assim, até 100 dias após o tempo inicial de simulação, percebemos a insistente permanência de uma faixa de constituinte na margem direita ainda nas proximidades da barragem. O enorme tempo que a mancha permanece no local na ausência de funcionamento das estações elevatórias nos mostra ser capaz de propiciar além de intensa deposição de sedimentos na região, grande atividade biológica, no caso do constituinte ser rico em nutrientes e matéria orgânica, propiciando *bloom* de algas, fato constante na região. Conforme HIDROPLAN, op. Cit., os primeiros movimentos organizados pela população em defesa da qualidade das águas da represa surgiram nessa região, provavelmente a mais afetada de todas no reservatório como um todo. Assim, o modelo reproduz o comportamento observado com relação ao deslocamento de poluentes, o que mostra que os parâmetros ajustados já permitem uma primeira análise do aspecto de poluição e que o modelo se adequa para estudos posteriores nesta linha de trabalho. Podemos dizer que os movimentos da população representam uma resposta social às consequências dos fatores físicos e biológicos que agem no reservatório.

Nos meses subsequentes de janeiro, fevereiro e março, quando o bombeamento se configurou mais intensamente, a mancha foi sendo empurrada em direção à Rodovia dos Imigrantes, ajudada pelo aumento da vazão oriunda dos Braços dos rios Taquacetuba e Bororé. Em meados de fevereiro, ela passou pelo estrangulamento sob a Rodovia dos Imigrantes e seguiu em direção ao Summit-Control. Nesse período, é importante notar que todos os braços, a exceção do Taquacetuba, apresentam um certo aprisionamento de constituintes, isto é, funcionam como zona morta. Também no mesmo período, o pico mais

alto de concentrações deixa a represa. É interessante relatar que a mancha, já com concentrações inferiores nessa ocasião, se dirige ao chamado Braço do Capivari, já na vertente Atlântica, local esse afetado por processo de deposição de sedimentos (HIDROPLAN, op. Cit., p.76). Ainda, de acordo com o modelo, numa região mais ao norte, as vazões do Rio Pequeno foram capazes de bloquear as correntes geradas no período de bombeamento. O gradiente de concentrações nessa região é menor que nas outras, e as correntes eram irrisórias, afastando as conseqüências das operações de bombeamento. Esta situação também mostra que a hidrodinâmica pode explicar a qualidade das águas em Billings, uma vez que as observações de campo mostram que as águas apresentaram sempre as melhores condições de qualidade neste local (HIDROPLAN, op. Cit., p.76).

Para o período compreendendo os meses de abril a setembro, foi concluído que os processos difusivos tomam conta da distribuição dos constituintes. Aliados ao vento, esses processos permitem concluir o seguinte. De acordo com o modelo, os dois estreitamentos encontrados, o primeiro sob a Rodovia dos Imigrantes e outro a pouco menos de 1 Km da entrada do Braço do Capivari parecem aprisionar o constituinte. É nessa região que foram observadas as maiores concentrações (simuladas) no período, sofrendo apenas uma lenta difusão na mancha. É interessante notar que no dia 17/03/1995 já é possível notar a distribuição característica da mancha na quase que total ausência do bombeamento. A formação de ondas geradas pelo soprar periódico do vento, é perceptível principalmente nos braços de menor vazão ou mesmo naqueles sem vazão, como é o caso do Braço do Capivari. É possível notar os vetores velocidade alternando a direção num certo período, caracterizando bem essa dinâmica. A necessidade de um estudo do período das ondas representadas no modelo se faz necessário. Muito provavelmente nos períodos mais quentes, que se iniciam no final de agosto até meados de dezembro, quando a operação de adução de água em Pedreira é pequena e estratificação térmica diurna se instala, deve haver a formação de *seiches* superficiais e internas que determinarão a variação temporal e espacial (espessura e posição vertical) da termoclina na represa como um todo. A seguir, apresenta-se a evolução da mancha no período estudado, em uma seqüência de figuras que pretendem elucidar os comentários aqui feitos.

Figura 9.3: Configuração da mancha pouco após o início do primeiro bombeamento em 25/10/1994. Valores no quadro correspondem às concentrações em unidades de concentração (u.c.)

Figura 9.4: Configuração da mancha cessado o Bombeamento em 27/10/1994. Valores no quadro correspondem às concentrações em unidades de concentração (u.c.)

Figura 9.5:Configuração da mancha após passado o mês de outubro de 1994 (1/11/94). Valores no quadro correspondem às concentrações em unidades de concentração (u.c.)

Figura 9.6: Configuração da mancha no dia 26/11/1994. Observe as concentrações em na região de Diadema. Valores no quadro correspondem às concentrações em unidades de concentração (u.c.)

Figura 9.7: Configuração da mancha no dia 01/12/1994. Valores no quadro correspondem às concentrações em unidades de concentração (u.c.)

Figura 9.8: Configuração da mancha no dia 01/01/1995. Valores no quadro correspondem às concentrações em unidades de concentração (u.c.)

Figura 9.9: Configuração da mancha no dia 07/01/1995. Valores no quadro correspondem às concentrações em unidades de concentração (u.c.)

Figura 9.10: Configuração da mancha no dia 01/02/1995. Valores no quadro correspondem às concentrações em unidades de concentração (u.c.)

Figura 9.11: Configuração da mancha no dia 21/02/1995. Valores no quadro correspondem às concentrações em unidades de concentração (u.c.)

Figura 9.12: Configuração da mancha no dia 26/02/1995. Valores no quadro correspondem às concentrações em unidades de concentração (u.c.)

Figura 9.13: Configuração da mancha no dia 01/03/1995. Valores no quadro correspondem às concentrações em unidades de concentração (u.c.)

Figura 9.14: Configuração da mancha no dia 17/03/1995. Valores no quadro correspondem às concentrações em unidades de concentração (u.c.)

Figura 9.15: Configuração da mancha no dia 01/04/1995. Valores no quadro correspondem às concentrações em unidades de concentração (u.c.)

Figura 9.16: Configuração da mancha no dia 11/04/1995. Valores no quadro correspondem às concentrações em unidades de concentração (u.c.)

Figura 9.17: Configuração da mancha no dia 21/04/1995. Valores no quadro correspondem às concentrações em unidades de concentração (u.c.)

Figura 9.18: Configuração da mancha no dia 01/05/1995. Valores no quadro correspondem às concentrações em unidades de concentração (u.c.)

Figura 9.19: Configuração da mancha no dia 01/06/1995. Valores no quadro correspondem às concentrações em unidades de concentração (u.c.)

Figura 9.20: Configuração da mancha no dia 11/07/1995. Valores no quadro correspondem às concentrações em unidades de concentração (u.c.)

Figura 9.21: Configuração da mancha no dia 15/07/1995. Valores no quadro correspondem às concentrações em unidades de concentração (u.c.)

Figura 9.22: Configuração da mancha no dia 17/07/1995. Valores no quadro correspondem às concentrações em unidades de concentração (u.c.)

Figura 9.23: Configuração da mancha no dia 21/07/1995. Valores no quadro correspondem às concentrações em unidades de concentração (u.c.)

Figura 9.24: Configuração da mancha no dia 26/07/1995. Valores no quadro correspondem às concentrações em unidades de concentração (u.c.)

Figura 9.25: Configuração da mancha no dia 01/08/1995. Valores no quadro correspondem às concentrações em unidades de concentração (u.c.)

Figura 9.26: Configuração da mancha no dia 01/09/1995. Valores no quadro correspondem às concentrações em unidades de concentração (u.c.)

Figura 9.27: Configuração da mancha no dia 05/09/1995. Valores no quadro correspondem às concentrações em unidades de concentração (u.c.)

Figura 9.28: Configuração da mancha no dia 01/10/1995. Valores no quadro correspondem às concentrações em unidades de concentração (u.c.)

Tendo em vista o reservatório Billings como importante componente do sistema de abastecimento de água e de produção de energia elétrica para Baixada Santista e Grande São Paulo (CALIJURI et. al., op. cit.) e seu alto grau de eutrofização, é imprescindível o uso de tecnologia para recuperação e um gerenciamento bem feito (com rígida fiscalização e avaliação dos usos múltiplos). O modelo aqui utilizado mostra-se promissor para avaliar o comportamento de Billings. A aferição do modelo descrito poderá transformá-lo num importante instrumento inicial deste gerenciamento, o qual poderá ser utilizado para atuar no sentido de se viabilizar um tempo maior de vida útil da represa (em termos de produção energética e abastecimento de água), além de um local mais propício para recreação e lazer, itens importantíssimos num cotidiano estressante como o da cidade de São Paulo.

Frisa-se que este estudo representa o primeiro esforço no sentido de estudar o reservatório de Billings como um todo, visando entender a qualidade da água nos diferentes pontos como decorrente das características hidrodinâmicas do reservatório. Verifica-se, aqui, que este ponto de vista é correto, levando em conta as possíveis conclusões já obtidas a partir de análises simples dos resultados observados por outros autores. Assim, encoraja-se a continuidade desses estudos e a sua utilização no real gerenciamento de Billings, de forma que esses trabalhos não passem a constituir apenas um arquivo morto de teses ou dissertações que se restringem aos espaços não-frequentados de nossas bibliotecas universitárias.

10 CONCLUSÕES SOBRE AS SIMULAÇÕES

De uma maneira geral, o reservatório Billings teve a sua dinâmica de macro escala representada pelo modelo bidimensional verticalmente integrado. Grandes avanços não poderão ser alcançados se não houver um monitoramento com vistas a uma aferição do modelo. As conclusões são abaixo assinaladas:

- A formação do campo de velocidades é um produto da combinação da dinâmica de vento e de bombeamento no reservatório, que na ausência destes permanece com as águas praticamente paradas. A agitação oriunda daquele primeiro fator constitui a principal forçante das águas nos períodos sem adução.
- Apesar da evidente necessidade de dados para uma aferição do modelo, os resultados referentes ao tempo de residência mostram que ele funciona adequadamente. Como evidenciado por CETESB, 1979, e também por meio do nosso trabalho, o trânsito no reservatório é extremamente dependente da operação de bombeamento. A relação com os níveis de água também se mostrou satisfatória.
- A aproximação das vazões de entrada dos rios se fez necessário e com resultados interessantes para simulações mais curtas. A discrepância dos valores reais, principalmente nos meses de maior intensidade de chuvas requer valores mais altos do coeficiente de *run-off*, muito provavelmente pelo solo estar mais saturado, com conseqüente aumento da descarga superficial. O monitoramento dessas entradas de água é relevante, pois elas são fundamentais no balanço de massa do sistema.
- Os braços do reservatório se apresentam como verdadeiras zonas mortas. Com exceção dos Braços dos Rios Pequeno e Taquacetuba que apresentam vazões capazes de frear o avanço da mancha, todos os outros apresentaram acúmulo de constituintes. Não é de se

estranhar que é relatado a sedimentação pronunciada no Braço do Capivari em HIDROPLAN, 1996.

- A região da margem direita do reservatório, nas proximidades da Barragem de Pedreira, é a que se mostrou mais suscetível aos efeitos nocivos do bombeamento. A combinação das altas concentrações de poluentes oriundas do Rio Pinheiros ao campo de correntes na região, propiciam tanto a deposição de sedimentos, que incorporam metais pesados bem como tempo suficiente e necessário para a assimilação de nutrientes e transformações biológicas degeneradoras da qualidade da água na região.
- A recuperação da qualidade das águas da Billings, como apontado nos trabalhos citados anteriormente, está intrinsecamente ligada à recuperação das águas da Bacia do Alto Tietê. Essas são responsáveis pelo estado de degradação do corpo hídrico, mas em contrapartida, a sua entrada no sistema é que é capaz de expelir os constituintes do reservatório. Parafraseando HIDROPLAN, *op. Cit.*, “Não acreditar na franca recuperação dos corpos d’água da Bacia do Alto Tietê, é condenar para sempre o estado de qualidade da água do reservatório Billings...”

11 RECOMENDAÇÕES FUTURAS

De acordo com os resultados acima explicitados, recomendamos os seguintes processos para futuras pesquisas:

1. Em relação a utilização do modelo IPH-A

- Planejar coletas de dados com vistas à aferição do modelo, incluindo a implementação de estações climatológicas para obtenção de dados de ventos e meios de obtenção das vazões dos rios em intervalo de tempo adequado.
- Estudar o transporte de constituintes não conservativos, como Coliformes, DBO e OD, por exemplo.
- Utilizar o modelo para simular eventuais intervenções antrópicas na represa, pois este se mostrou eficaz na representação da hidrodinâmica da represa, mesmo sendo ele o primeiro estudo a considerar o movimento das águas do reservatório como um todo.

2. Em relação à utilização de outros modelos

- De acordo com o estado da arte atual em relação a modelagem de reservatórios, a aplicação de um modelo tridimensional é interessante. Um estudo da dinâmica e influência das ondas geradas pelo vento, bem como da dinâmica de entrada e saída de água do reservatório será melhor representada por meio uma análise mais detalhada como no caso tridimensional. Com vistas nesse tipo de aplicação é que poderemos entender e utilizar de forma mais "sustentável" a represa.
- Aplicando eventualmente um modelo tri-dimensional, fazer uma modelagem adequada da qualidade de água no reservatório, nunca desacompanhada do

monitoramento mencionado anteriormente, a fim de caracterizar a capacidade de mistura vertical, transversal e longitudinal seja no período de estratificação ou não.

12 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABBOTT, M. B., DAMSGAARD, A., RODENHUIS, G. S. (1973). System 21, "JUPITER" (a Design System for Two-Dimensional Nearly-Horizontal Flows). in. *Journal of Hydraulic Research*. v.11, n.1. p. 1-28.
- ABBOTT, M. B., LARSEN, J., TAO, J. (1985). Modelling Circulations in Depth-Integrated Flows. Part 1: The Accumulation of the Evidence. in. *Journal of Hydraulic Research*. v.23, n.4. p. 309-26.
- ABBOTT, M. B., LARSEN, J. (1985). Modelling Circulations in Depth-Integrated Flows. Part 2: A Reconciliation. in. *Journal of Hydraulic Research*. v.23, n.5. p.397-420
- AGENDA 21 (1998). *CAPÍTULO 18. Proteção da Qualidade e do Abastecimento dos Recursos Hídricos: Aplicação de Critérios Integrados no Desenvolvimento, Manejo e Uso dos Recursos Hídricos*. <http://www.mma.gov.br/port/SE/agen21/cap.18.html>. (04 fev.)
- ARAÚJO, A. M., PIRES, T. T. (1998). Simulação Exploratória dos Efeitos das Marés na Circulação e Transporte Hidrodinâmicos da Bacia do Pina. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*. Porto Alegre. ABRH v.3, n.3, p. 57-72.
- BLAIN, W. R. & KLATSIFARAKIS, K. L.; eds. (1994). *Hydraulic Engineering Software V Vol. 2: Free Surface Flow and Hydraulic Software*. Southampton. Estados Unidos. Computation Mechanics Publications.
- BORCHE, A.(1994).Aplicativo para Modelação de Estuários e Lagoas. *Ecos*. n.1, p. 21-3, mai.
- BORCHE, A.(1996). Manual de Utilização do Sistema - IPII-A Aplicativo para Modelação de Estuários e Lagoas. Porto Alegre, IPII – UFRGS.
- BRANCO, S. M. (1991) A Água e o Homem. in. Porto, R. L. ed. *Hidrologia Ambiental*. São Paulo. EDUSP/ABRIL. p. 3-26.
- CALIJURI, M. C., PETRACCO P., LAGE FILHO, A. L. (1995). *Recuperação e Manejo da Represa Billings-SP: Recomendações e Perspectivas Futuras*. São Carlos. /Relatório Parcial de Atividades (Fev.-Dez./1994) Convênio USP/ELETROPAULO/
- CALIJURI, M. C., PETRACCO P., LAGE FILHO, A. L. (1996). *Recuperação e Manejo da Represa Billings-SP: Recomendações e Perspectivas Futuras*. São Carlos. /Relatório Parcial de Atividades (Fev.-Dez./1995) Convênio USP/ELETROPAULO/
- CALIJURI, M. C., PETRACCO P., LAGE FILHO, A. L. (1996). *Recuperação e Manejo da Represa Billings-SP: Recomendações e Perspectivas Futuras*. São Carlos. /Relatório Final de Atividades Convênio USP/ELETROPAULO/
- CASALAS, A. B. & CYBIS, L F. (1985). Modelo Matemático de Circulação e Qualidade das Águas do Estuário do Rio Guaíba. In: Simpósio Brasileiro de Hidrologia e Recursos Hídricos, 6., 1985. *Anais*. São Paulo. ABRH. p. 419-33.
- CHOW V. T. (1959). *Open Channel Hydraulics*. McGraw Hill Book. Co.. New York.

- DAWDY, D. R. (1969). Mathematical Modeling in Hydrology. In: The progress of Hydrology - International Seminar for Hydrology Professors, I., 1969. *Proceedings*. Urbana, University of Illinois, v. 1, p.346-61.
- EIGER, S. (1989). Modelos de Escoamento Turbulentos in : SILVA, R. V., ed. *Métodos Numéricos em Recursos Hídricos*. Rio de Janeiro, ABRH. p. 84-150.
- EIGER, S. (1991). Qualidade da Água em Rios e Estuários. in: Porto, R. L. ed. *Hidrologia Ambiental*. São Paulo. EDUSP/ABRHH. p. 69-164
- FANTON, A. C., PION, O. B. B., GUERRA, M. O. (1985). A Experiência da ELETROPAULO em Recuperação de Barragens. In: Seminário Nacional de Grandes Barragens, 16., Belo Horizonte, 1985. *Anais*. - Minas Gerais, CEMIG, v.1, p 289-95.
- FLOKSTRA, C. (1977). The Closure Problem for Depth-Averaged Two-Dimensional Flow. In: Congress of the International Association for Hydraulic Research, 17., Baden-Baden, 1977. *Proceedings*. Alemanha, IAHR. v. 2, p. 247-56.
- GRAY, W. G., PINDER, G. F., BREBBIA, C. A.; eds. (1977). Finite Elements in Water Resources. In: International Conference on Water Resources, 1., Princeton, 1976. *Proceedings*. Estados Unidos, Pentech Press.
- HIDROPLAN - Plano Integrado de Aproveitamento e Controle dos Recursos Hídricos das Bacias Alto Tietê, Piracicaba e Baixada Santista - Utilização da Billings (1995). São Paulo, CRH/DAEE.
- IMBERGER, J (1979). Mixing in Reservoirs. In: FISCHER, H. B. (ed.) *Mixing in Inland and Coastal Waters*. San Diego. Academic Press. P.148-228.
- IMBERGER, J (1994). Transport Processes in Lakes: A Review. In: MARGALEF, R (ed.). *Limnology Now, a Paradigm of Planetary Problems*. Amsterdam. Elsevier Science. p.99-193
- MÜNNICH, M., WÜEST, A., IMBODEN, M. (1992). Observations of the Second Vertical Mode of the Internal Seiche in an Alpine Lake. in. *Limnology and Oceanography*. v.37, n.8, p. 1705-19.
- LEENDERTSE, J. J. (1967). *Aspects of a Computational Model for Long - Period Water Wave Propagation*. Santa Monica, The Rand Corporation/USAF. (Memorandum RM-5294-PR).
- LEENDERTSE, J. J. (1970). *A Water Quality Simulation Model for Well-Mixed Estuaries and Coastal Seas: Volume I, Principles of Computation*. Santa Monica, The Rand Corporation/USAF. (Memorandum RM-6230-RC).
- LEONARD, B. P. (1988). Simple High Accuracy Resolution Program for Convective Modelling of Discontinuities. in. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*. Nova Iorque. John Wiley and Sons, Ltd. v.8, p. 1291-318.
- LIGHTHILL, M. J.; WHITHAM, G. B. (1955). *On Kinematic Waves I: Flood Movement in Long Rivers*. *Proceedings of the Royal Society. S. A*, v. 229, p. 281-316.
- MAGALHÃES, P. C. (1989). Hidrologia Superficial. in: Ramos, F. ed. *Engenharia Hidrológica* Rio de Janeiro, Ed. UFRJ/ABRH. p.201-92.
- MARTIN, J. L. (1988). Application of Two-Dimensional Water Quality Model. *Journal of Environmental Engineering*, v. 114, n.2, p. 317-36, april.
- MELLOR, G. L. (1998). *User's guide for a three dimensional, primitive equation, numerical ocean model*. Princeton University. Princeton. 40p.
- MONTEIRO JUNIOR, L. A. (1998). *Implantação de um modelo tridimensional para a circulação das águas induzida pelo vento em lagos*. São Carlos. 88p, Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo.
- MUJIN, M.; SPAULDING, M. (1996). Two-Dimensional Boundary-Fitted Circulation Models in Spherical Coordinates. *Journal of Hydraulics Engineering*, v.122, n. 9, p. 512-521, september.

- NISHIDA, P., (1995). *Análise de um modelo numérico para a represa do lobo, utilizando a técnica dos elementos finitos*. São Carlos. 102p, Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo.
- NOYE, J. (1982). *Finite Difference Methods for Partial Differential Equations*. North Holland Publishing Co.
- O'CONNOR, W. P. (1991). *A User's Manual for the Princeton Numerical Ocean Model*. Institute for Naval Oceanography. Stennis Space Center. 69 p.
- OLIVEIRA DE JESUS, J. A. (1989). *Modelo Numérico de Circulação e Qualidade da Água em Estuários bem Misturados. Aplicação no Estuário do Guaíba*. São Carlos. 162p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo.
- PONCE, V. M. et YABUSAKI, S. B. (1980). *Mathematical Modeling of Circulation in Two-Dimensional Plane Flow*. Fort Collins, Colorado State University. /Final Report to National Science Foundation/. (Grant n. CME-7805458).
- PONCE, V. M. et YABUSAKI, S. B. (1981). Modeling Circulation in Depth-Averaged Flow - *Journal of Hydraulics Division*, n.107, p. 1501-18, november.
- PRANDLE, D. et CROOKSHANK, N. L. (1984). Numerical Model of Saint Lawrence River Estuary - *Journal of Hydraulics Division*, n.100, p. 517-29, april.
- PRINOS, P. & ZERIS, A. (1994). Turbulent Flows in Open Channels with Steep Slopes. In: BLAIN, W. R. & KLATSIFARAKIS, K. L., ed. *Hydraulic Engineering Software V Vol. 2: Free Surface Flow and Hydraulic Software*. Southampton. Computational Mechanics Publications. Section 1, p. 31 - 8.
- RIGHETTO, A. M. (1998). *Hidrologia e Recursos Hídricos*. São Carlos. Projeto REENGE - EESC-USP.
- ROSENBERG, D. U. (1969). *Methods for Numerical Solutions of Partial Differential Equations*. American Elsevier Publishing Company, Inc.
- ROSMAN, P. C. (1989). Modelos de Circulação em Corpos D'água Rasos. In : SILVA, R. V., ed. *Métodos Numéricos em Recursos Hídricos*. Rio de Janeiro, ABRH. Cap. 3, p. 156-221.
- RUTHERFORD, J. C. (1994) *River Mixing*. Chichester, John Willey & Sons, p. 347.
- SAGGIO, A. A. (1992). *Estudo da eutrofização do reservatório de Barra Bonita (Rio Tietê - SP) através de simulação Numérica*. São Carlos, 1992, 105 p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- SALOMON, J. C. (1976). *Modèle Mathématique de la Propagation de la Marée en Estuaire et des Transports Sableux Associés. Application aux Estuaires de La Loire et de La Seine*. França. Tese (Doutorado) - Université de Bretagne Occidentale.
- SILVEIRA, L. L., TUCCI, C. E. M. (1998). Monitoramento em Pequenas Bacias para a Estimativa de Disponibilidade Hídrica. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*. Porto Alegre. ABRH v.3, n.3, p. 97-110.
- SILVEIRA, L. L., TUCCI, C. E. M., SILVEIRA, A. L. L. (1998). Quantificação de Vazão em Pequenas Bacias sem Dados. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*. Porto Alegre. ABRH v.3, n.3, p. 111-31.
- SOUZA FILHO, F. A. (1995). *Modelação numérica da hidrodinâmica em canais com a utilização de modelos de turbulência*. São Carlos, 1995, 148 p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- TUCCI, C. E. (1980). *Hidrodinâmica de Rios e Canais*. São Paulo. E. P. Universidade de São Paulo/Departamento de Águas e Energia Elétrica. /Comunicação Técnica nº 9/

- TUCCI, C. E. org. (1993). *Hidrologia: Ciência e Aplicação*. Porto Alegre. Ed. da Universidade/FE/USP/ABRIL
- TUNDISI, J. G. (1981). Typology of Reservoirs in Southern Brazil. *Verh. Internat. Verein. Limnol.* n.21. p. 1031-1039.
- TUNDISI, J. G. (1988). *Limnologia e Manejo de Represas*. Universidade de São Paulo/Academia de Ciências do Estado de São Paulo. v. 1 e2. São Paulo.
- TUNDISI, J. G. (1989). Management of Lakes and Reservoirs in Brazil. in.: Jorgensen S. E. & Vollenweider, R. A. eds. *Guidelines for Lakes Management*. ILEC, UNEP. p. 155-169.
- Van POUCKE, L., VERHOEVEN, R., VERDONCK, P. (1994). Interactive Control of Hydraulic Structures. In: BLAIN, W. R. & KLATSIFARAKIS, K. L., ed. *Hydraulic Engineering Software V Vol. 2: Free Surface Flow and Hydraulic Software*. Southampton. Computational Mechanics Publications. Section 1, p. 47 -55.
- WANG, H. P. (1977). Multi-Levelled Finite Element Hydrodynamic Model of Block Island Sound. In: Finite Elements in Water Resources - International Conference on Finite Element in Water Resources, I., *Proceedings*, Estados Unidos, Pentech Press, p. 4.69-4.94.
- WANG, J. O. et. CONNOR, J. J. (1975). *Mathematical Modeling of Nearcoastal Circulation*. Washington D. C., Massachussets Institute of Technology, Rept. 200.
- WEARE, T. J. (1976). Instability in Tidal Flow Computational Schemes. *Journal of Hydraulics Division*. n.102, p. 569-80.
- WETZEL, R. G. (1975) Water Movements In: *Limnologia*. Philadelphia, W. B. Saunders. P. 89-122
- SILVA, R. V. (1989). *Métodos Numéricos em Recursos Hídricos*. Rio de Janeiro. ABRIL.
- YANG, J.C. & WU, C. I. (1994). Sediment Transport Modelling by Coupling Technics. In: BLAIN, W. R. & KLATSIFARAKIS, K. L., ed. BLAIN, W. R. & KLATSIFARAKIS, K. L. Section 1, p. 11-18.
- YU, L.; GENG, Z.; ROMA, W. N. L.; RIGHETTO A. M.; XIONG, S. (1998). Two and Three-Dimensional Nested Simulation by Using FEM and FVA to Analyze Flows in a Estuary. *Mathl. Comput. Modelling* v.28, n.11, 115-34.
- YU, L.; RIGHETTO A. M. (1996). Recent Advances and Application of Turbulence Depth-Integrated Two-Equation Closure for Modelling Contaminant Discharges. *J. of the Braz. Soc. Mechanical Sciences*. v.XVIII, n.4, p338-54. December.
- YEVJEVICH, V (1972). *Stochastic Methods in Hydrology*. Ann Arbor. Water Resources Publications.

APÊNDICE

Manual de Utilização do Sistema IPH

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	3
DESCRIÇÃO DOS MODELOS DE CIRCULAÇÃO E TRANSPORTE DE MASSA	4
MÉTODO DE RESOLUÇÃO	5
CARACTERÍSTICAS DO APLICATIVO	5
NOTAÇÃO E DEFINIÇÕES INICIAIS	9
LINHAS E COLUNAS EFETIVAS DE CÁLCULO	9
LOCALIZAÇÃO DAS VARIÁVEIS NA QUADRÍCULA DE CÁLCULO	11
FORMAS DE INGRESSAR O CONTORNO	12
MÉTODO GRÁFICO DE INGRESSO	12
MÉTODO DE INGRESSO ATRAVÉS DE ARQUIVOS	13
SOBRE A TELA PRINCIPAL DO PROGRAMA INICIAL	14
SOBRE A FORMA DE ARMAZENAMENTO DE DADOS USADA NO APLICATIVO	15
SOBRE O MENU FINAL DO PROGRAMA INICIAL	16
FORMAS DE INGRESSO DA BATIMETRIA. PROGRAMA GEOTEL	18
DEFINIÇÃO DO TIPO DE CONDIÇÃO DE CONTORNO	20
DEFINIÇÃO DOS PARÂMETROS E CONDIÇÕES DE CONTORNO	
PARA UMA SIMULAÇÃO	21
EXECUÇÃO DOS PROGRAMAS CALCULO1 E CALCULO2	25
DESCRIÇÃO DO MENU PRINCIPAL	25
ESTRUTURA DOS ARQUIVOS DE SAÍDA	33
COMPLEMENTOS	34
MUDANDO O CONTORNO DO MODELO	34
INSTALAÇÃO DO APLICATIVO. OPERANDO EM DOS. OPERANDO EM WINDOWS.	34
MUDANDO AS CORES DAS SAÍDAS GRÁFICAS	35
ACRÉSCIMOS E DESENVOLVIMENTOS	37

INTRODUÇÃO

O trabalho de muitos anos no Instituto de Pesquisas Hidráulicas da UFRGS em modelação de estuários e lagoas permitiu o desenvolvimento de um sistema computacional, versátil e de fácil utilização em microcomputadores do tipo PC, destinado à simulação do escoamento e transporte de massa em corpos de água bidimensionais. O método utilizado pelo sistema IPH-A, para a resolução numérica das equações que definem o escoamento, é baseado na técnica de diferenças finitas, semi-implícita de direções alternadas. As equações da continuidade e dinâmica, previamente integradas na vertical, consideram a perda de carga junto ao fundo, a ação do vento na superfície, a força de Coriolis e um coeficiente de difusão turbulenta. O mesmo método é utilizado para solução numérica da equação de advecção-difusão.

Este sistema é aplicável ao estudo de corpos de água em que as dimensões horizontais sejam fortemente predominantes sobre as dimensões verticais, no qual as componentes horizontais da velocidade possam ser descritas por valores médios na vertical. Em cada elemento da malha de cálculo são determinadas, durante o tempo de simulação, as variações de velocidade e de nível. Essas variações são obtidas em função das modificações que ocorrem nas condições de contorno estabelecidas nas fronteiras abertas (vazão ou nível) e da intensidade do vento que atua na superfície. Para o caso de transporte e difusão de contaminantes é utilizada, em cada iteração, a equação de advecção-difusão, obtendo-se a variação da concentração do contaminante em cada elemento. Esta variação é calculada a partir do campo de velocidades, das variações de concentração nas fronteiras abertas e dos valores desta nos pontos em que o material poluente é despejado.

A utilização deste tipo de modelação matemática em rios de largura considerável, estuários e lagoas permite, desde que apoiada num conjunto de dados apropriados e corretamente levantados, a compreensão da importância de cada um dos fatores que atuam no escoamento. O estudo deste comportamento hidrodinâmico é importante na definição de ações tais como: dragagem de canais, escolha de pontos de lançamento de esgotos e efluentes industriais (construção de emissários), avaliação do impacto de obras de aproveitamento hídrico e seu planejamento, determinação de locais para tomada de águas, previsão de zonas sujeitas a erosão.

O desenvolvimento desse aplicativo iniciou com a modelação do estuário do Rio Guaíba e foi aperfeiçoado nos estudos realizados na Lagoa dos Patos, Rio da Prata, Rio Uruguai, Lagoa Setúbal (Santa Fé, Argentina) e Praia de Ipanema (Rio Guaíba).

Descrição dos modelos de circulação e transporte de massa

Equações básicas

Para descrever o escoamento em águas pouco profundas, bem como o transporte e a difusão de um contaminante neste meio, são usadas as seguintes equações para o caso bidimensional:

a) Equações do escoamento:

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} - \Omega V + g \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{g U \sqrt{U^2 + V^2}}{C_h H} - \frac{\tau_{sx}}{H} - \nu_t \Delta U = 0$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} + \Omega U + g \frac{\partial \zeta}{\partial y} + \frac{g V \sqrt{U^2 + V^2}}{C_h H} - \frac{\tau_{sy}}{H} - \nu_t \Delta V = 0$$

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial (HU)}{\partial x} + \frac{\partial (HV)}{\partial y} = 0$$

b) Equação de transporte de massa:

$$\frac{\partial (CH)}{\partial t} + \frac{\partial (CHU)}{\partial x} + \frac{\partial (CHV)}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(HD_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(HD_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) + PHC + RH$$

onde:

- U, V componentes do vetor velocidade nas direções x e y
- ζ nível medido a partir de um plano de referência fixo
- h profundidade referida a este plano
- H profundidade total ($H = h + \zeta$)
- Ω aceleração de Coriolis
- τ_{sx} τ_{sy} componentes da tensão de cisalhamento na superfície
- C_h coeficiente de Chèzy
- ν_t coeficiente de dissipação turbulenta
- C concentração integrada na vertical
- D_x D_y coeficientes de dispersão nas direções x e y
- P coeficiente de decaimento
- R termo de fonte

Método de resolução

Para cada direção, num primeiro momento, é obtido o campo de velocidades e, a seguir, é resolvida a equação de advecção-difusão. Em cada intervalo de tempo, o cálculo é realizado em duas etapas: primeiro é efetuado em cada linha o cálculo do nível e da componente U da velocidade através da resolução de um sistema linear tridiagonal pelo método de dupla varredura. A seguir, também, linha por linha e de forma análoga, são calculadas as concentrações. A segunda etapa consiste na determinação das componentes V das velocidades, de novos níveis e das concentrações repetindo para as colunas o mesmo tipo de cálculo realizado para as linhas na primeira etapa.

O esquema de resolução baseia-se no esquema proposto originalmente por Lendertsee (1967,1970), porém com algumas modificações. Por exemplo, as batimetrias são informadas nos mesmos pontos onde são calculadas as componentes da velocidade.

No referido esquema são utilizadas diferenças centradas na solução da equação de transporte de massa. Para o caso em que a relação $U \cdot \Delta x / D$ é maior do que 2, o uso de diferenças centradas para discretizar o termo convectivo traz problemas de instabilidade. Neste caso é comum observar que as concentrações calculadas oscilam a montante da fonte. O emprego deste esquema obriga então, quando as velocidades são altas, a usar modelos "encaixados" e o transporte de massa é calculado só no modelo de malha refinada que possui um Δx compatível com a relação indicada.

Para a solução da equação de advecção-difusão foi implementado um novo esquema numérico usando uma aproximação de maior ordem para o cálculo do termo de convecção. A técnica utilizada é a da interpolação quadrática no sentido do escoamento proposta por Leonard (1977,1988) e que permite melhorar de forma considerável o problema referido.

Características do aplicativo

O sistema pode ser instalado em qualquer computador da linha PC sem exigências especiais de memória, mas que deverá ter co-processor matemático e monitor colorido para uma melhor visualização das saídas gráficas.

O armazenamento, bem como o esquema de cálculo, foi otimizado para permitir um melhor desempenho. Em um microcomputador de 640k de memória, pode-se executar um modelo de, aproximadamente, até 4600 elementos internos.

Para a implementação de um modelo de circulação são necessários os seguintes dados de entrada:

- configuração geométrica (contorno e batimetria);
- condições de contorno para cada simulação (níveis ou velocidades nas fronteiras abertas e intervalo de tempo em que são fornecidos);
- intervalo de tempo de cálculo, tamanho da malha, rugosidade do fundo, constante de atrito do vento, coeficiente de viscosidade turbulenta, nível inicial e latitude;
- velocidade e direção do vento em cada instante para toda a área de simulação ou, em casos de grandes corpos de água, em diferentes pontos, para que o modelo obtenha mediante interpolação o valor da tensão de cisalhamento em cada elemento da malha.

Se for necessária a simulação da dispersão de um contaminante deverão ainda ser fornecidas as seguintes informações:

- concentração inicial;
- indicação do tipo de condição de contorno em cada elemento da fronteira aberta e, caso necessário, informação do valor da concentração ao longo do tempo de simulação;
- valor dos coeficientes de difusão longitudinal e transversal assim como o coeficiente de decaimento (T90 para o caso de coliformes);
- localização das fontes quantidade e concentração do poluente despejado.

Nos elementos de fronteira em que as condições de contorno não permanecem constantes deverá ser indicado o arquivo que contém os valores a utilizar. Deverá também ser informado o intervalo de tempo em que são fornecidos estes dados, de forma a que o sistema obtenha os valores necessários mediante interpolação.

Os parâmetros de ajuste do modelo são:

- o coeficiente de Chèzy (C_h) usado no cálculo da perda de carga junto ao fundo. Ele pode ser informado diretamente ou calculado em cada elemento através das formulas:

$$C_h = \frac{H^{1/6}}{n} \quad \text{ou} \quad C_h = \frac{\sqrt{g}}{k} \left[\ln \left(\frac{H}{z_0} \right) - 1 \right]$$

onde:

- n - coeficiente de Manning
- k - constante de Karman
- z_0 - rugosidade do fundo

- o coeficiente que relaciona a tensão de cisalhamento na superfície livre com o quadrado da velocidade do vento C_v de acordo com as formulas:

$$\tau_{sx} = C_v \cdot W_x \cdot \sqrt{W_x^2 + W_y^2} \quad \tau_{sy} = C_v \cdot W_y \cdot \sqrt{W_x^2 + W_y^2}$$

onde:

- W_x e W_y - componentes da velocidade do vento
- C_v - coeficiente de ajuste

- o coeficiente de dissipação turbulenta (ν_t)
- os coeficientes de difusão longitudinal e transversal (D_l e D_t), a partir dos quais são calculados os coeficientes D_x e D_y através das formulas:

$$D_x = D_l \cdot \cos^2 \theta + D_t \cdot \sin^2 \theta \quad \text{e} \quad D_y = D_l \cdot \sin^2 \theta + D_t \cdot \cos^2 \theta$$

onde:

- θ - ângulo entre o vetor velocidade com o eixo x.

- o coeficiente de decaimento (P).

A modelação torna-se simples pelo uso de programas que facilitam o ingresso e a modificação do contorno, da batimetria e do tipo de condições de contorno.

O sistema é constituído por uma sequência de programas (ver diagrama) que são a seguir sucintamente descritos:

INICIAL - Serve para introduzir o contorno o que pode ser feito de diversas maneiras.

GEOTEL - Permite introduzir ou alterar a batimetria o que pode ser feito graficamente na tela ou através da leitura de um arquivo. Atualiza o arquivo ARQGEO.XXX

CHEZYTEL - Possibilita a definição do coeficiente de perda de carga em cada elemento.

CONDICON - Permite, usando o cursor, definir e alterar o tipo de condição de contorno nas fronteiras abertas.

PRECALC1 - Gera o arquivo ARQLIM.XXX com todas as informações necessárias para o cálculo do escoamento. Através deste programa são fornecidos os parâmetros para cada simulação, os dados de vento e os dados para cada condição de

contorno (o nome do arquivo que os contém ou um único valor se a condição se mantiver constante).

PRECALC2 - Gera o arquivo ARQLIMC.XXX com todas as informações necessárias para o cálculo da dispersão de um contaminante. Através deste programa são fornecidos os parâmetros para cada simulação, os pontos de lançamento com sua carga e os dados para cada condição de contorno (o nome do arquivo que os contém ou um único valor se a condição se mantiver constante).

CALCULO1 - A partir dos dados fornecidos pelos arquivos ARQCONT.XXX, ARQGEO.XXX, e ARQLIM.XXX, efetua a resolução numérica da parte hidrodinâmica pelo método de diferenças finitas de direções alternadas.

CALCULO2 - A partir dos dados fornecidos pelos arquivos ARQCONT.XXX, ARQGEO.XXX, ARQLIM.XXX e ARQLIMC.XXX efetua a resolução numérica da equação de transporte de massa sobre um campo de velocidades calculado previamente ou, para o caso não permanente, calcula este campo em cada iteração de tempo. Trata-se do programa CALCULO1 incrementado com o cálculo da difusão.

Antes de iniciar cada simulação podem ser indicados locais nos quais os valores de níveis calculados são armazenados, a fim de serem graficados posteriormente. O mesmo pode ser feito em relação às velocidades e concentrações. O programa de cálculo permite também a indicação de pontos de lançamento de flutuadores sendo calculadas suas trajetórias segundo a evolução do campo de velocidades.

O cálculo pode ser interrompido a qualquer momento aparecendo um menu de opções gráficas que permitem visualizar:

- os valores das componentes da velocidade, dos níveis e das concentrações em cada elemento a medida que o cursor é deslocado na área de simulação.
- o campo de velocidades em qualquer região da simulação, mediante o uso de "zoom";
- a trajetória de flutuadores, também com uso de "zoom";
- os gráficos de velocidades ou níveis ocorridos, durante a simulação, em lugares fixados no início do cálculo.
- curvas de nível do módulo de velocidades, dos níveis, da amplitude de oscilação dos níveis, da concentração e das batimetrias;

Após cada interrupção, o cálculo pode ser continuado ou podem ser gravadas todas as variáveis para posterior reinicialização.

O cálculo de cada intervalo de tempo para um modelo com 4600 elementos internos consome menos de meio segundo num computador pentium DX100, 2 segundos num DX486 de 50 MHz e 25 segundos num 286 de 16 MHz

O corpo de água a modelar é aproximado através de uma malha quadrada, de lado dx , que possui M linhas, N colunas e $M \times N$ elementos. O contorno real L é substituído por um contorno L adaptado à malha. O contorno L , por razões de cálculo, deve estar afastado em pelo menos um dx dos limites da malha. Na figura é mostrado um exemplo simples composto por poucos elementos.

No contorno é fornecida informação para o cálculo. Para o caso do estudo hidrodinâmico, a velocidade normal à costa é considerada nula nas partes em que a fronteira é fechada. Nos lugares em que a fronteira é aberta, é necessário informar ou o nível ou a

velocidade normal. Desta forma temos que as linhas e colunas efetivas de cálculo são classificadas entre os seguintes nove tipos:

- 1 - FF - fechada - fechada
- 2 - FV - fechada - velocidade
- 3 - VF - velocidade - fechada
- 4 - VV - velocidade - velocidade
- 5 - FN - fechada - nível
- 6 - VN - velocidade - nível
- 7 - NF - nível - fechada
- 8 - NV - nível - velocidade
- 9 - NN - nível - nível

A geometria do modelo exemplo fica definida através da seguinte sequência de dados:

M=10, N=15

NL=9 (número total de linhas efetivas de cálculo)

<i>linha n°</i>	<i>coluna inicial</i>	<i>coluna final</i>	<i>tipo de linha</i>
2	6	8	1
3	4	9	1
4	4	10	1
5	4	7	1
5	8	14	5
6	4	12	1
7	4	11	1
8	3	8	1
9	1	6	3

NC=16 (número total de colunas efetivas de cálculo)

<i>coluna n°</i>	<i>linha inicial</i>	<i>linha final</i>	<i>tipo de coluna</i>
2	8	9	1
3	8	9	1
4	7	9	1
5	2	6	1
5	6	9	1
6	2	9	1
7	1	4	1
7	4	8	1
8	2	4	1
8	5	8	1
9	2	7	1
10	3	7	1
11	4	7	1
12	4	6	1
13	4	5	1
14	4	5	1

Aqui foi considerado que as velocidades serão informadas na borda esquerda do elemento 69 e que os níveis serão fornecidos no lado direito do elemento 36, únicas fronteiras abertas, o que determina os tipos de linha 3 e 5 de acordo a convenção adotada.

Localização das variáveis na quadrícula de cálculo

As variáveis que intervêm no cálculo estão distribuídas espacialmente em cada elemento da malha de acordo com a seguinte figura:

A batimetria na quadrícula está, desta forma, definida pelos valores das profundidades em cada um de seus lados. A área da seção entre dois elementos para o nível zero é dada pelo produto $h \times dx$. A velocidade normal média na seção é definida pelo valor de u (ou de v). O nível z e a concentração c estão localizados no centro da quadrícula e representam o valor médio no elemento.

FORMAS DE INGRESSAR O CONTORNO

Existem duas formas de fazer o levantamento do contorno e da batimetria a partir da carta que contenha os dados existentes da região em estudo.

A forma tradicional é usar papel vegetal no qual previamente foi desenhada a malha, com o tamanho do dx preestabelecido, sobre a qual se aproxima o contorno de forma conveniente. Nos lados das quadrículas internas é anotado o valor da batimetria. A partir dos dados no papel vegetal pode ser ingressada a geometria do modelo. Para tanto é possível usar diversos tipos de arquivos, os quais podem ser elaborados com um editor de textos qualquer.

Outra forma de proceder é usar uma mesa digitalizadora mediante a qual são obtidos dois arquivos: o primeiro contém o contorno e o segundo as curvas de nível. O primeiro arquivo é usado pelo programa INICIAL e o segundo pelo programa GEOTEL.

Ao executar o programa INICIAL a primeira tela que surge tem as seguintes opções:

- 1) LER ARQUIVO CONTENDO LINHAS (E COLUNAS) DE CÁLCULO
- 2) LER ARQUIVO COM COORDENADAS DOS VÉRTICES DO CONTORNO
- 3) INGRESSAR O CONTORNO EM FORMA GRÁFICA

Analise as diferentes opções.

Método gráfico de ingresso

O método gráfico é acessado através da opção 3 a qual nos leva à seguinte escolha:

O CONTORNO FOI DIGITALIZADO (S/N)

Esta pergunta deverá ser respondida afirmativamente, caso tenha sido usada uma mesa digitalizadora na qual foi levantado o contorno.

O arquivo contendo o contorno deve estar em código ASCII e os dados separados por vírgulas, retorno ou espaço. O arquivo apresentará a sequência de pontos de cada trecho do contorno precedida pelo número de pontos que a integram. Cada ponto será dado por suas coordenadas em unidades da mesa. Deverá ser conhecida a escala que indicará, em metros, o valor de cada unidade da mesa (esta é obtida combinando a escala da carta com a da mesa).

Caso responda negativamente, o contorno poderá ser desenhado a mão livre usando as setas do teclado. Isto serve fundamentalmente para implementar exemplos didáticos. No caso devem ser indicadas, previamente, as dimensões da malha.

Após a resposta afirmativa surge a seguinte pergunta:

INFORMAR DX (S/N)

Se responder afirmativamente será necessário ingressar com o valor de dx e da escala. Se responder negativamente deverá ser informado o número de linhas e colunas da malha. No primeiro caso as dimensões da malha são determinadas automaticamente; no segundo é o dx que ficará definido a partir do valor da escala.

Método de ingresso através de arquivos

A forma de ingresso da geometria através de arquivos é acessada usando as opções 1) ou 2).

Opção 1) Esta opção permite introduzir a geometria mediante a leitura de um arquivo ASCII contendo:

M, N
 LT
 $L_i, J1_i, J2_i, IL_i \ (i = 1, \dots, LT)$
 CT
 $C_j, L1_j, L2_j, IC_j \ (j = 1, \dots, CT)$

M - número de linhas, N - número de colunas,
 LT - número total de linhas efetivas de cálculo,
 parâmetros das linhas de cálculo:

L_i - n° de linha, $J1_i$ - coluna inicial, $J2_i$ - coluna final, IL_i - tipo de linha de cálculo,

CT - número total de colunas efetivas de cálculo

parâmetros das colunas de cálculo:

C_j - n° de coluna, $L1_j$ - linha inicial, $L2_j$ - linha final, IC_j - tipo de coluna de cálculo.

É permitido que o arquivo contenha só as linhas efetivas de cálculo (sem o parâmetro de tipo de linha). Neste caso deverá ser agregado ao contorno, na segunda etapa deste programa, os trechos separadores de colunas como as linhas que dividem, no exemplo, as colunas efetivas de cálculo localizadas nas colunas 5 e 7. No caso de escolha da opção 1) uma pergunta será feita sobre a existência ou não das colunas de cálculo no arquivo:

O ARQUIVO CONTÉM:

1) SÓ LINHAS EFETIVAS DE CÁLCULO

2) LINHAS E COLUNAS EFETIVAS DE CÁLCULO

No caso do arquivo conter também as colunas efetivas de cálculo o parâmetro tipo de linha ou de coluna é opcional aparecendo na tela a seguinte pergunta:

O ARQUIVO CONTÉM O CAMPO INDICANDO O TIPO DE LINHA (COLUNA)?

No caso em que o arquivo não contenha este parâmetro será assumido o valor 1 por definição. O tipo de linha (coluna) efetiva de cálculo pode ser alterado posteriormente usando o programa CONDICON.

Opção 2) Esta opção possibilita o ingresso do contorno através das coordenadas dos vértices precedidas do valor de M, N, NV (NV - número total de vértices). O arquivo como todos os arquivos do sistema, possui formato ASCII e os vértices devem estar em sequência. O último ponto de cada trecho é repetido duas vezes, o que serve para indicar o fim do trecho. O contorno do modelo, no exemplo, pode ser representado por uma sequência de pontos que são os vértices da parte externa do contorno e outra que corresponde à ilha.

Para esta forma de ingresso, e no caso do exemplo, é possível usar qualquer um dos seguintes arquivos:

ARQUIVO 1:	ARQUIVO 2:	ARQUIVO 3:	ARQUIVO 4:
10, 15 9 2, 6, 8, 1 3, 4, 9, 1 9, 1, 6, 3 16 2, 8, 9, 1 3, 8, 9, 1 14, 4, 5, 1	10, 15 9 2, 6, 8 3, 4, 9 9, 1, 6 16 2, 8, 9 3, 8, 9 14, 4, 5	10, 15 9 2, 6, 8 3, 4, 9 9, 1, 6	10, 15 34 6, 1 6, 2 4, 2 4, 6 5, 6 4, 6 4, 7 6, 1 6, 1 6, 4 ..8, 4 7, 4

Sobre a tela principal do programa INICIAL

Após o ingresso dos dados aparecerá uma tela gráfica contendo a grade em forma de pontos (os vértices de cada quadrícula) e, dependendo da opção, o contorno digitalizado, ou o contorno do modelo, ou nenhum dos dois. No caso de se ter o contorno real graficado, poderá o mesmo ser rotado em relação aos eixos usando as setas do teclado. As teclas + e - aumentam e diminuem o ângulo de rotação para cada toque. A rotação do contorno digitalizado serve para melhor adequá-lo à grade e também possibilita o aproveitamento da memória do computador de forma mais eficiente como veremos adiante. Uma vez concluída esta ação é digitada a tecla "enter".

Um cursor em forma de seta aparecerá no canto superior esquerdo. A seguir, dependendo da opção, o contorno do modelo será inserido ou alterado usando as seguintes teclas:

- insert - para incluir trecho.
- R - para retirar trecho.
- espaçamento - para anular o efeito de incluir ou retirar.
- setas - para movimentar o cursor.

Quando a operação de traçado do contorno estiver concluída digite a tecla "enter". Após o cálculo surgirá uma mensagem indicando as dimensões do modelo. No exemplo: 10 x 15 e 80 (dimensão usada), indicando o número total de quadrículas integrantes das linhas e das colunas efetivas de cálculo. Este número não deverá ultrapassar o valor de 5000, podendo o programa de cálculo apresentar problemas para valores acima de 4600.

Sobre a forma de armazenamento de dados usada no aplicativo

Com a finalidade de otimizar a velocidade de processamento e a utilização da memória, o aplicativo armazena os dados de níveis, batimetrias, velocidades, concentrações e outros parâmetros referentes a cada quadrícula de cálculo em forma vetorial. Se numeramos os elementos conforme a maneira mostrada anteriormente temos, no exemplo, que determinado valor correspondente ao elemento situado na linha 7 e coluna 6 ocupará a posição 51. O programa inicial calcula os elementos de um vetor **AR** de dimensão **M** que permite localizar o número de elemento **K1** a partir dos números de linha e coluna. No exemplo, o vetor **AR** terá as seguintes componentes:

$$AR = (-6, -2, 4, 11, 22, 34, 45, 56, 67, 74)$$

Assim o valor k_I será obtido da seguinte forma:

$$K1 = AR(I) + J, \quad I - \text{número de linha}, \quad J - \text{número de coluna}$$

A utilização desta estratégia, que permite facilmente relacionar número do elemento com linha e coluna, obriga muitas vezes a numerar elementos totalmente externos. O exemplo anterior, com a discretização feita sobre o contorno real girado em 120°, é mostrado na figura que segue.

O uso desta forma de indexação leva a numerar as quadrículas de uma linha compreendidas entre aquelas que contenham valores que entram no cálculo. Assim no exemplo

as dimensões dos vetores aumentaram de 80 para 86 já que foi necessário indexar quadrículas das linhas 11 e 12 que são externas ao contorno e não tem nenhum lado em comum com este.

O vetor **AR**, neste caso, tem as seguintes componentes:

AR = (-2, 0, 4, 9, 15, 21, 29, 38, 48, 57, 67, 76)

A posição da grade em relação ao contorno real deve ser escolhida de forma a melhor representar a área a modelar e também deverá considerar esta forma de armazenamento do aplicativo. Optou-se por esta estratégia já que a utilização direta de matrizes implica em armazenar desnecessariamente zeros (todos os elementos da malha externos ao modelo devem estar incluídos), além de tornar a execução mais lenta por causa da dupla indexação.

O programa **INICIAL** gera, além do vetor **AR**, os vetores de índices **IL%** e **IC%** que indicam a posição do elemento em relação ao contorno. O valor de **IL%** referente a cada quadrícula é atribuído de acordo com a seguinte regra:

0 - quadrícula interior da linha de cálculo que possui o vértice superior direito ou o inferior direito, ou ambos no contorno;

1 - quadrícula interior da linha de cálculo que não possui os vértices do lado direito no contorno;

2 - quadrícula inicial ou final de uma linha de cálculo;

3 - quadrícula final de uma linha de cálculo que por sua vez é inicial para outra linha de cálculo.

O valor de **IL%** para quadrículas não pertencentes a linhas efetivas de cálculo é 1.

O vetor **IC%** é construído de forma análoga só que referido as colunas efetivas de cálculo.

Os vetores **IL%** e **IC%** são usados no cálculo das derivadas.

Sobre o menu final do programa INICIAL.

No menu final aparecem as seguintes alternativas:

1) VERIFICAR CONTORNO

2) MUDAR NO GRÁFICO POSIÇÃO DO QUADRO DE VALORES

3) GRAVAR ARQUIVOS GEOMETRIA E CONTORNO

4) COORDENADAS DOS VÉRTICES

5) FIM

A opção 1) serve para visualizar o contorno final e os índices atribuídos a cada elemento.

A opção 2) pode ser usada para relocar de forma conveniente o quadro de valores.

Em ambos casos o deslocamento é feito usando as setas no teclado.

O item 3) permite gravar os arquivos **ARQGEO** e **ARQCONT**: referentes a cada modelo escolhendo uma extensão de três caracteres.

O arquivo *ARQGEO* é estruturado da seguinte forma:

M, N
 LT
 $L_i, J1_i, J2_i, IL_i \ (i = 1, \dots, LT)$
 CT
 $C_j, L1_j, L2_j, IC_j \ (j = 1, \dots, CT)$
 K0
 $AR_i \ (i = 1, \dots, k_0)$
 $IL\%_i \ (i = 1, \dots, k_0)$
 $IC\%_i \ (i = 1, \dots, k_0)$

onde:

M - número de linhas, N - número de colunas,

LT - número total de linhas efetivas de cálculo,

parâmetros das linhas de cálculo:

L_i - n° de linha, $J1_i$ - coluna inicial, $J2_i$ - coluna final, IL_i - tipo de linha,

CT - número total de colunas efetivas de cálculo

parâmetros das colunas de cálculo:

C_j - n° de coluna, $L1_j$ - linha inicial, $L2_j$ - linha final, IC_i - tipo de coluna,

K0 - número total de elementos numerados na malha. Dimensão dos vetores

principais.

KR, IL%, IC% - vetores acima definidos.

O arquivo *ARQCONT* contém :

E1, E2
 NV
 $X_i, Y_i \ (i = 1, \dots, NV)$
 DX, XMIN, YMIN, FI

NPC	}	para cada trecho do contorno digitalizado
$XC_i, YC_i \ (i = 1, \dots, NV)$		

onde:

E1, E2 - número de linha e coluna do vértice superior esquerdo do quadro de valores.

NV - número de vértices do contorno do modelo.

X_i, Y_i - coordenadas dos vértices do contorno do modelo.

NPC - número de pontos do trecho do contorno digitalizado.

XC_i, YC_i - coordenadas dos pontos do contorno digitalizado.

XMIN, YMIN - menor abcissa e menor ordenada do contorno digitalizado.

FI - ângulo em que foi girado o contorno digitalizado em relação a posição original.

A opção 4) serve para visualizar as coordenadas dos vértices do contorno.

FORMAS DE INGRESSO DA BATIMETRIA. PROGRAMA GEOTEL

Os valores da batimetria são informados em relação a um determinado nível considerado como zero. Este nível de referencia é geralmente aquele que foi levado em conta na elaboração da carta utilizada. Assim, a profundidade total em um dado instante resulta da soma do nível nesse momento (referenciado ao zero assumido) mais a batimetria informada na carta.

O menu inicial do programa GEOTEL é o seguinte:

- 1) VER, ENTRAR OU ALTERAR BATIMETRIAS
- 2) LER BATIMETRIAS DE UM ARQUIVO
- 3) GRÁFICO DAS BATIMETRIAS POR FAIXAS
- 4) PREENCHER BATIMETRIAS INTERPOLANDO
- 5) PREENCHER BATIMETRIAS GRAFICAMENTE
- 6) FIM

As opções 1), 2) e 5) estão relacionadas com as três possibilidades de informar as profundidades. A escolha da primeira permite deslocando-se no gráfico e mediante o uso das setas do teclado, ir informando ou alterando a batimetria. Nessa tela, as teclas **S**; **A**; **U**; **V**; **L**; e **C** produzem os seguintes efeitos:

S - permite o ingresso em forma sequencial, a partir do cursor e de acordo com a numeração das quadrículas anteriormente vista, das batimetrias **HU** e **HV** passando de uma quadrícula a outra automaticamente.

A - usada para alterar os valores de **HU** e **HV** da quadrícula apontada pelo cursor. O mesmo efeito de **S** porém não muda o cursor para o próximo elemento quando digitado "enter".

U - idem **A** porém usada só para alterar **HU**.

V - idem **A** porém usada para alterar só **HV**.

L - possibilita alterar índice **IL%** do elemento (em princípio não deve ser usada).

C - possibilita alterar índice **IC%** do elemento (em princípio não deve ser usada).

A localização dos valores na quadrícula de cálculo é dada pelo seguinte diagrama:

A segunda opção permite o ingresso da batimetria mediante a leitura de arquivos. Um arquivo deve conter uma matriz com os valores das profundidades **HU** e outro, uma matriz com **HV**. As matrizes tem dimensões **M**×**N** e estão ordenadas sequencialmente por linhas ou

por colunas. A numeração das linhas pode crescer ou decrescer em relação ao sentido positivo do eixo y. A numeração das colunas deve crescer em relação ao eixo x.

Existe por último a forma gráfica de ingresso das profundidades. Usando uma mesa digitalizadora podem ser levantadas as curvas de nível. O arquivo deverá ter a mesma estrutura do arquivo contendo o contorno real digitalizado, a única diferença é que neste arquivo cada ponto será dado por três valores: a coordenada x, a coordenada y e a profundidade. As curvas de nível são visualizadas na tela conforme mostra a figura:

Usando as setas do teclado para movimentar o cursor, tendo por referência as curvas de nível, é possível introduzir a batimetria. É necessário considerar para tanto que as teclas A, U, V tem o mesmo significado que na opção 1) e que:

“insert” - transporta os últimos valores digitados para as quadrículas que são apontadas no movimento do cursor.

R - recupera os valores anteriores nas quadrículas em que a batimetria foi alterada.
espaçamento - desativa as teclas “insert” e R.

A seguir, ativando a opção 4) de interpolação, completa-se o preenchimento das profundidades. O procedimento pode ser usado mesmo quando as curvas de nível não estejam presentes na tela.

O procedimento de interpolação (opção 4) do menu) substitui as profundidades nas quadrículas onde o valor é zero (ou igual a outra constante previamente informada) por um valor médio da batimetria nos elementos mais próximos e não nulos.

DEFINIÇÃO DO TIPO DE CONDIÇÃO DE CONTORNO.

Para definir ou modificar o tipo de condição de contorno nas fronteiras abertas do modelo é usado o programa CONDICON. Para o cálculo hidrodinâmico podem na borda ser informados valores de velocidade (fronteira tipo V) ou valores de nível (fronteira tipo N). As fronteiras fechadas são do tipo F. No caso do cálculo de transporte de massa nas fronteiras abertas é possível estabelecer que o gradiente de concentração seja nulo (fronteira tipo G), usada para deixar sair o contaminante. A outra opção é indicar o valor da concentração (fronteira tipo C). As fronteiras fechadas são, como no caso hidrodinâmico, do tipo F. Temos assim, como já vimos anteriormente, nove tipos de linhas e colunas de cálculo sob o ponto de vista do cálculo do escoamento e nove tipos sob o ponto de vista do cálculo do transporte de massa.

Linhas (colunas) de cálculo circulação: FF, FV, VF, VV, FN, VN, NF, NV, NN.

Linhas (colunas) de cálculo transporte: FF, FG, FC, GF, GG, GC, CF, CG, CC.

O menu principal do programa CONDICON é o seguinte:

- 1) LINHAS DE CÁLCULO CIRCULAÇÃO
- 2) COLUNAS DE CÁLCULO CIRCULAÇÃO
- 3) LINHAS DE CÁLCULO TRANSPORTE
- 4) COLUNAS DE CÁLCULO TRANSPORTE
- 5) FIM

QUAL A OPÇÃO:

NO GRÁFICO APRESENTADO NAS OPÇÕES 1) E 2) USE AS SETAS PARA MUDAR DE LINHA OU COLUNA E AS TECLAS NUMÉRICAS PARA MUDAR O TIPO DE CONDIÇÃO DE CONTORNO. DIGITE ESC SE QUIZER RETORNAR A ESTE MENU.

Selecionando uma das primeiras quatro opções, através de uma tela gráfica, podem ser alterados os tipos de linha ou coluna de cálculo segundo o indicado. Nesta tela gráfica, as setas no teclado servem para percorrer as diferentes linhas (colunas) de cálculo. As teclas numéricas mudam o tipo de linha (coluna) de cálculo.

No fim do programa é possível gravar o arquivo *ARQGE0* com os novos valores para o tipo de linha ou coluna. Pode ser gerado um novo arquivo ou alterado o anterior. No caso em que tenham sido definidos tipos de linhas para o transporte, dois vetores *ILC* e *ICC* são acrescentados ao arquivo contendo os tipos de linha e coluna.

DEFINIÇÃO DOS PARÂMETROS E CONDIÇÕES DE CONTORNO PARA UMA SIMULAÇÃO

Para introduzir os valores dos parâmetros e das condições de contorno são utilizados os programas PRECALC1 e PRECALC2. O primeiro é usado para as condições que intervêm na circulação e o segundo para aquelas que participam no cálculo do transporte.

O menu do programa PRECALC1 é o seguinte:

- 1) INFORMAR PARÂMETROS E NOME DOS ARQUIVOS NECESSÁRIOS PARA GERAR O ARQUIVO ARQLIM USADO NA EXECUÇÃO DO PROGRAMA DE CÁLCULO.
- 2) LEITURA DO ARQUIVO ARQLIM\$ GERADO ANTERIORMENTE.
- 3) CORREÇÃO DO INFORMADO EM 1) OU LIDO EM 2)
- 4) GRAVAÇÃO DOS ARQUIVOS ARQLIM E ARQLIM\$.
- 5) VERIFICAR DADOS CONTIDOS NO ARQUIVO ARQLIM
- 6) FIM.

A opção 1) permite atribuir valores aos seguintes parâmetros:

a) intervalo de tempo de cálculo. Valor expresso em minutos. Deve respeitar os critérios de estabilidade numérica.

b) tamanho da quadrícula de cálculo. Valor expresso em metros.

c) Latitude em graus. O valor para o hemisfério sul foi considerado positivo. É usado na definição do coeficiente de Coriolis.

d) Coeficiente de viscosidade turbulenta. Intervêm no termo de dissipação, derivada de segunda ordem da velocidade. Valores possíveis entre 0 e $20 \text{ m}^2/\text{s}$.

e) Coeficiente de atrito do vento (coeficiente de arraste do vento, adimensional, multiplicado pela densidade relativa do ar). No modelo é considerada a tensão de cisalhamento na superfície proporcional ao quadrado da velocidade do vento. Valores tomados da literatura oscilam entre $1.5\text{E}-6$ e $4\text{E}-6$.

f) Nível inicial. Toda simulação começa a partir de uma posição de repouso: um nível dado, igual para todo o corpo de água e velocidades nulas.

d) Coeficiente de Chézy. Este coeficiente de rugosidade do fundo pode ser determinado das seguintes formas:

$$1) C_h = H^{1/6} / Mn$$

nível).

H - profundidade total no ponto (batimetria +

Mn - coeficiente de Manning.

$$2) C_h = (\sqrt{g} / K_r) \cdot \ln(H / z_0 - 1)$$

K_r - constante de Karman.

z₀ - rugosidade do fundo.

$$3) C_h = \text{cte}$$

Esta determinação é feita para os casos 1) e 2), em cada elemento da malha e em cada intervalo de tempo, de acordo com o valor de H . Caso se deseje manter o coeficiente de Chézy constante durante todo o cálculo em todo o modelo deve se usar a opção 3).

No caso que, em determinadas quadrículas da grade (ou em todas) seja necessário atribuir valores diferentes para o coeficiente de Chézy, deve ser usado o programa CHEZYTEL. A sistemática para atribuição dos valores em cada elemento usada no programa CHEZYTEL é análoga à usada no programa GEOTEL. Estes valores são acrescidos em forma de dois vetores CHU e CHV no fim do arquivo ARQGEO e permanecem constantes durante todas as simulações. Nos elementos em que o coeficiente não foi definido usando o programa CHEZYTEL, ou seja permanecem nulos, será determinado seu valor através da opção geral de cálculo adotada acima. O mesmo acontecerá se o programa CHEZYTEL não for executado.

Na próxima tela do programa PRECALC1 são solicitados dados sobre o vento. É possível informar valores constantes nas direções x e y ou indicar o nome de um arquivo que contenha estes dados espaçados num determinado intervalo de tempo. A estrutura do arquivo é dada por uma seqüência com pares de valores (vento na direção de cada um dos eixos) em formato ASCII e separados por vírgula espaço ou "enter". Os valores podem ser informados em m/s ou km/h. A seguir é necessário fornecer essa informação assim como o intervalo de tempo dos dados.

Para os dados de contorno aparece uma tela gráfica. Uma seta aponta os pontos do contorno aberto onde deve ser dada informação. Da mesma forma que com os dados de vento, os valores podem ser constantes ou variáveis através do tempo e informados mediante arquivo. Usando a tecla de espaçamento pode-se escolher, no quadro de valores, o campo para informar um valor constante ou o campo de nome do arquivo, diretório e intervalo de tempo dos dados variáveis. A estrutura destes arquivos é a de uma seqüência de valores em código ASCII separados por vírgula, espaço ou "enter".

A opção 2) possibilita recuperar dados digitados anteriormente e gravados num arquivo ARQLIMC\$.

O item 3) permite corrigir dados procedendo à execução da seqüência de ingresso de informação da opção 1) alterando o dado existente ou confirmando-o mediante a digitação de "enter".

A opção 4) do programa é usada para gravar os arquivos ARQLIM e ARQLIM\$. O primeiro contém os parâmetros e os dados já interpolados prontos para serem lidos seqüencialmente pelo programa de cálculo. Sua estrutura é a seguinte:

DT, DX, LA, EP, CV, NI, MN, KAR, Z0, CH, NCF

TX, TY

V_i ($i = 1, \dots, \text{NCF}$)

}
}
}

tantos grupos quantos intervalos de tempo a calcular.

onde: DT - intervalo de cálculo (min), DX - tamanho da quadrícula (m), LA - latitude (graus, positiva para o hemisfério sul), EP - coeficiente de viscosidade turbulenta, CV - constante de atrito do vento, NI - nível inicial, MN - constante de Manning, KAR - constante de Karman, Z0 - rugosidade do fundo, CH - constante de Chézy, NCF - número de condições de contorno que devem ser informadas em cada iteração de

tempo, TX, TY - velocidades do vento nas direções x e y (m/s), V - valores informados para as condições de contorno (m ou m/s). Dependendo da forma de cálculo do coeficiente de Chézy os valores de MN, KAR, Z0 e CH serão nulos ou não.

O arquivo ARQLIM\$ contém os parâmetros informados e o nome dos arquivos em que estão os dados de vento e condições de contorno. Ele é menor que o arquivo ARQLIM e serve como arquivo de salvamento dos dados digitados de forma a, posteriormente usando a opção 2), poder fazer correções.

Usando a opção 5) podem ser verificados os dados de vento e de condições de contorno gravados em qualquer arquivo ARQLIM. Estes dados podem ser mostrados na tela ou impressos.

O menu do programa PRECALC2 é o seguinte:

- 1) INFORMAR, DIRETAMENTE OU ATRAVÉS DE ARQUIVOS, AS CONDIÇÕES NO CONTORNO NECESSÁRIAS PARA GERAR O ARQUIVO ARQLIMC USADO NO CÁLCULO. ESTES DADOS SERÃO ARMAZENADOS EM ARQLIMC\$ EM 4).
- 2) LEITURA DE ARQUIVO ARQLIMC\$ GERADO ANTERIORMENTE
- 3) CORREÇÃO DO INFORMADO EM 1) OU LIDO EM 2)
- 4) INFORMAR OS PARÂMETROS NECESSÁRIOS AO CÁLCULO DO TRANSPORTE E GRAVAÇÃO DOS ARQUIVOS ARQLIMC E ARQLIMC\$
- 5) VERIFICAR DADOS CONTIDOS NO ARQUIVO ARQLIMC
- 6) FIM

Ao digitar 1) aparece uma tela gráfica onde uma seta aponta os pontos da fronteira aberta para os quais deve ser dada informação. Da mesma forma que no caso hidrodinâmico (programa PRECALC1), os valores podem ser constantes ou, se são variáveis através do tempo, informados mediante arquivo. Usando a tecla de espaçamento pode-se escolher, no quadro de valores, o campo para informar um valor constante ou o campo para nome do arquivo, diretório e intervalo de tempo dos dados variáveis. A estrutura destes arquivos é a de uma sequência de valores em código ASCII separados por vírgula, espaço ou "enter".

Se a fronteira não tem nenhum ponto no qual deva ser informada a concentração do contaminante, a escolha da opção 1) não tem sentido, mantendo-se a tela no menu principal. Isto acontece se o contorno é todo ele do tipo fechado ou de gradiente de concentração nulo.

A opção 2) possibilita recuperar dados digitados anteriormente e gravados num arquivo ARQLIMC\$.

O item 3) permite corrigir dados procedendo à execução da sequência de ingresso de informação da opção 1) alterando o dado existente ou confirmando-o mediante a digitação de "enter".

Existem duas formas de realizar o cálculo da dispersão: na primeira é usado um campo de correntes previamente calculado e que se mantém permanente na segunda, a hidrodinâmica do corpo de água modelado é resolvida junto com o transporte. Na primeira forma, o intervalo de tempo de cálculo do campo de correntes (que é obtido usando o programa CALCULO1) não é necessariamente o mesmo daquele utilizado para o cálculo do transporte (programa CALCULO2). Na segunda, o intervalo de tempo de cálculo é único, já que em cada dt o

programa CALCULO2 resolve numericamente as equações hidrodinâmicas e a seguir as equações referentes ao transporte do contaminante.

Quando é escolhida a forma de cálculo com um campo permanente de correntes deve ser executado o programa PRECALC1 seguido pelo programa CALCULO1, gravando-se o arquivo SA no momento de obter o campo de correntes desejado. Procede-se então à execução dos programas PRECALC2 e CALCULO2. A extensão dos arquivos ARQLIM, ARQLIMC e SA deve ser a mesma.

Quando se opta por executar juntos o cálculo hidrodinâmico e o cálculo do transporte, a seqüência de execução é: PRECALC1, PRECALC2 e CALCULO2. A extensão dos arquivos ARQLIM e ARQLIMC deve ser a mesma.

Na opção 4) do menu, a primeira pergunta é sobre a forma de cálculo escolhida:

O CÁLCULO SERÁ FEITO EM REGIME PERMANENTE UTILIZANDO CAMPO DE CORRENTES JÁ CALCULADO?

A seguir deverão ser informados os parâmetros necessários para o cálculo do transporte que são os seguintes:

DT - Intervalo de tempo de cálculo. Caso a pergunta acima tenha sido respondida afirmativamente, deve-se confirmar digitando "enter" o valor apresentado, o qual é o mesmo que foi informado na execução do programa PRECALC1.

CDL - Coeficiente de difusão longitudinal.

CDT - Coeficiente de difusão transversal.

T90 - Tempo em horas em que desaparece o 90% do contaminante. Permite o cálculo do coeficiente de decaimento.

CI - Concentração inicial em todo o domínio.

Após fornecer estas informações segue a seguinte pergunta:

EXISTEM PONTOS DE DESPEJO DE COLIFORMES (S/N):

Caso seja dada resposta afirmativa, aparece uma tela gráfica. O uso das setas do teclado permite movimentar um ponteiro, o qual deve ser localizado no ponto de despejo. Digitando "I", esse ponto é incluído, devendo-se a seguir informar os valores da carga despejada (m^3/s) e a concentração da mesma. As opções de exclusão, verificação dos valores de carga e concentração, retorno ao menu principal e gravação dos arquivos ARQLIMC e ARQLIMC\$ completam o menu desta tela.

Usando a opção 5) podem ser verificados os dados correspondentes as condições de contorno gravados em qualquer arquivo ARQLIMC. Estes dados podem ser mostrados na tela ou impressos. Se no modelo não existirem condições de contorno que devam ser informadas a escolha deste item será inócua, retornando-se ao menu principal.

EXECUÇÃO DOS PROGRAMAS CALCULO1 E CALCULO2

Descrição do menu principal

O programa CALCULO1 permite o cálculo isolado da hidrodinâmica. O programa CALCULO2 serve para o cálculo do transporte de contaminantes a partir de um campo de correntes previamente calculado pelo programa CALCULO1 ou, no caso de escoamento não permanente, para o cálculo simultâneo da hidrodinâmica e do transporte.

No início da execução do programa CALCULO1 devem ser informados as extensões dos arquivos *ARQGE0*, *ARQLIM* e *ARQCONT* e o nome do diretório onde estão localizados, caso não se encontrem no diretório corrente. A seguir, surgirá uma tela contendo o valor dos parâmetros que intervêm no cálculo e, no canto inferior direito, aparecerá a seguinte pergunta:

DESEJA CONTINUAR CÁLCULO ANTERIOR (S/N)

Os programas CALCULO1 e CALCULO2 podem continuar uma execução anterior se no final da mesma foi gravado o arquivo *SA* (arquivo de salvamento). A simulação será retomada a partir do intervalo de tempo em que foi interrompida sendo os novos dados calculados anexados aos arquivos de saída *ARQNS*, *ARQVS* e *ARQTS*. Quando for retomada uma execução que foi interrompida sem se ter salvo o arquivo *SA*, o programa utilizará, para dar continuidade ao cálculo, o último arquivo *SA* gravado que tenha a extensão indicada. Uma mensagem indicará, no caso, o excesso de dados presente nos arquivos *ARQNS*, *ARQVS* e *ARQTS* e, caso seja dado prosseguimento ao cálculo, estes arquivos serão truncados de forma a ficar em concordância com o arquivo *SA*, sendo os novos dados de cálculo anexados a partir deste ponto.

Quando o cálculo está sendo iniciado e, por consequência, a pergunta acima é respondida de forma negativa, as seguintes informações deverão ser fornecidas:

- a) intervalos de tempo em que o cálculo deverá ser interrompido para permitir o exame dos valores calculados;
- b) locais onde os valores de nível devem ser armazenados no decurso da simulação;
- c) idem para as velocidades;
- d) local e instante de lançamento de flutuadores de forma a possibilitar a gravação das trajetórias dos mesmos.

Nos casos b) e c) um cursor em uma tela gráfica permitirá apontar os pontos da malha selecionados. Antes porém, e caso existam, serão exibidos os números dos elementos da malha selecionados na execução anterior, devendo-se digitar "S" caso permaneçam os mesmos. Já no item d), deverão ser indicadas as coordenadas do ponto de lançamento referenciadas aos eixos e a escala do modelo (o ponto de coordenadas 1,5, 9,5 é o ponto central do elemento interseção da linha 10 com a coluna 2).

Após concluída esta etapa, o cálculo começa a ser executado, aparecendo na tela embaixo o número de iteração e o tempo de cálculo. Para interromper a execução basta pressionar a tecla "p" o que ativa o menu principal:

ITERAÇÃO: nnnn

- A - NÍVEIS MÁXIMOS ACONTECIDOS NA MALHA
- B - NÍVEIS MÍNIMOS ACONTECIDOS NA MALHA
- C - CONTINUA O CÁLCULO
- E - EXAME DOS VALORES CALCULADOS
- F - FINALIZA
- G - GRAVA ARQUIVO SA.XXX
- L - GRÁFICO DE NÍVEIS SOLICITADOS
- N - NÍVEIS NA MALHA
- O - OSCILAÇÕES MÁXIMAS ACONTECIDAS NA MALHA
- S - GRÁFICO DE VELOCIDADES COMO SETAS
- T - GRÁFICO DE TRAJETÓRIAS SOLICITADAS
- U - VELOCIDADES NA DIREÇÃO X
- V - VELOCIDADES NA DIREÇÃO Y
- W - GRÁFICO DE VELOCIDADES SOLICITADAS
- Z - GRÁFICO POR FAIXAS

F11 - ATIVA E DESATIVA DESENHO DA GRADE

F12 - ATIVA E DESATIVA DESENHO DA MARGEM

ALT-V - ATIVA E DESATIVA MOSTRADOR DE VENTO

DIGITE ESC PARA VOLTAR A ESTE MENU

A opção **N** permite localizar as regiões do modelo onde o nível encontra-se acima de um valor dado. A opção **A** serve para determinar os elementos da malha onde o nível ultrapassou, em algum momento do cálculo, determinado valor. O item **B** possibilita identificar os locais onde o nível esteve em algum momento abaixo de um valor definido. Digitando a tecla **O**, podem ser visualizados os pontos onde a oscilação do nível, durante o cálculo, superou um valor previamente informado. Os itens **U** e **V** servem para identificar os lugares onde as componentes **u** e **v** da velocidade são superiores a um valor informado. Em todos estes casos, antes da tela gráfica, é solicitado o ingresso do valor correspondente em m ou m/s dependendo da opção.

A opção E possibilita visualizar, em cada ponto da malha, os valores dos níveis e velocidades calculadas. Usando as setas do teclado, o apontador se deslocará mostrando em cada ponto o conteúdo das variáveis ZU (nível obtido no cálculo da linha), ZV (nível obtido no cálculo da coluna), U (velocidade na direção x) e V (velocidade na direção y) no quadro de valores.

A opção S permite obter o mapa de correntes de uma região do modelo. Uma escala é sugerida para o gráfico das flechas, já que o tamanho delas é proporcional à velocidade. Pode-se alterar ou confirmar esta escala. A escala está definida pela relação entre o tamanho da flecha para uma velocidade dada e o tamanho da quadrícula de cálculo. Assim, para uma escala igual a 1, uma velocidade de 1m/s tem um comprimento de uma quadrícula e meia; numa escala de 10, a seta de 1 m/s equivale a quinze quadrículas. Uma tela gráfica contendo a circulação em todo o modelo é apresentada a seguir. Usando as setas do teclado (provocam o deslocamento do quadro de "zoom"), as teclas "+" e "-" (aumentam e diminuem verticalmente o quadro de "zoom") e as teclas "A" e "D" (aumentam e diminuem horizontalmente o quadro de "zoom") pode ser escolhida uma determinada área. Após digitar "enter", obtém-se o mapa de correntes desta área.

Na figura anterior é mostrada a região selecionada para o "zoom". Nas figuras seguintes, aparece o mapa de correntes em dois momentos diferentes do cálculo.

Na segunda figura foi desativada a opção de desenho da margem digitalizada (tecla F12, ver menu principal).

Para visualizar o gráfico dos níveis correspondentes aos pontos selecionados no início do cálculo é necessário escolher o item L. Na tela, que aparece a seguir, devem-se escolher os pontos para os quais se deseja obter o gráfico de nível compreendido entre o início da simulação e o momento da atual interrupção. Podem graficar-se desta forma os linigramas calculados em diversos pontos do modelo com a finalidade, por exemplo, de visualizar o

deslocamento de uma onda. Os dados para o gráfico são tomados do arquivo *ARQNS*, onde em cada iteração são armazenados os valores dos níveis, em código ASCII, nos pontos escolhidos e na ordem em que foram seleccionados.

A figura acima mostra dois pontos escolhidos no modelo do Rio da Prata. Na figura abaixo os correspondentes gráficos de vários ciclos de maré astronômica.

Para o caso do gráfico das velocidades, opção **W**, a sistemática é a mesma. A diferença está em que para cada ponto são desenhados três gráficos: o da componente *x*, o da componente *y* e o do valor absoluto da velocidade. Não é possível obter, através do programa de cálculo, o gráfico de vários pontos no mesmo desenho. Os dados são tomados do arquivo *ARQVS*, no qual existem para cada iteração, tantos pares de componentes *U* e *V* da velocidade quantos pontos foram seleccionados.

A visualização das trajetórias dos flutuadores lançados pode ser obtida mediante a opção T. Uma tela gráfica permite escolher quais trajetórias devem ser desenhadas sendo que uma mecânica de “zoom” semelhante a do item S possibilita o desenho na escala apropriada.

Nas figuras é mostrado o percurso de um flutuador na simulação da Lagoa dos Patos, a esquerda na forma em que aparece na primeira tela, a direita após o uso do “zoom”.

Pressionando a tecla Z, no menu principal, obtém-se o acesso ao gráfico por faixas. A seguinte tela é mostrada previamente:

OS ELEMENTOS SERÃO COLORIDOS DE ACORDO AO VALOR DE UMA DAS SEGUINTE VARIÁVEIS:

- F1 - NÍVEIS ZV
- F2 - NÍVEIS ZU
- F3 - MAX [ZV(t)]
- F4 - MIN [ZV(t)]
- F5 - MAX [ZV(t)] - MIN [ZV(t)]
- F6 - MÓDULO DAS VELOCIDADES
- F7 - VELOCIDADES NA DIREÇÃO X
- F8 - VELOCIDADES NA DIREÇÃO Y

A opção F1 mostra os elementos da malha coloridos de acordo com os valores dos níveis ZV obtidos na última iteração, no cálculo por coluna do método de direções alternadas. Todas as quadrículas, situadas entre duas curvas de nível consecutivas, são apresentadas com a mesma cor.

Pressionando a tecla F2, obtém-se o mesmo resultado, porém os valores usados são os níveis ZU determinados no cálculo por linha.

A tecla F3 permite estabelecer as faixas no gráfico de acordo com os maiores valores da variável ZV obtidos ao longo da simulação em cada elemento da malha. As teclas F4 e F5 tem função análoga correspondendo aos menores níveis registrados e a diferença entre os maiores e os menores níveis respectivamente.

As teclas F6, F7 e F8 tem função similar, sendo que o gráfico corresponde às variáveis U, V e a raiz quadrada de $U^2 + V^2$ respectivamente.

Escolhida a opção deverá optar-se entre o estabelecimento dos limites de faixa em forma automática ou a informação, via teclado, do valor correspondente a cada uma das cinco curvas de nível que separam as faixas coloridas. Qualquer uma das alternativas **Fn** permanece ativa ao continuar o cálculo sendo que na forma automática os limites de faixa mudam em cada iteração o que não acontece quando as faixas são informadas. A forma não automática permanece ativa até uma nova interrupção do cálculo e nova escolha. O pressionar de uma das teclas **Fn** durante a execução determina o aparecimento da tela gráfica correspondente. Para desativar esta opção pressione a barra de espaço.

A seguir é mostrado um gráfico de faixas, com e sem desenho, da malha do modelo do Rio da Prata. Para desativar e ativar o desenho da grade é necessário pressionar a tecla **F11** durante a exibição do menu principal do cálculo.

Pressionando as teclas **F11** e **F12** durante a exibição do menu principal é possível ativar e desativar as opções de desenho da margem digitalizada e da malha de cálculo respetivamente. Da mesma forma, digitando a sequência “**ALT**” - “**V**”, ativa-se e desativa-se o mostrador de vento o qual, em cada instante de tempo do cálculo, indica a direção e velocidade do vento. Isto é válido quando esta em funcionamento uma das telas gráficas **Fn**. Na figura abaixo, é mostrado o gráfico por faixas **F1** do modelo da Lagoa dos Patos onde aparece o mostrador de vento.

As telas do programa **CALCULO2** são similares às do programa **CALCULO1**. No menu principal por motivos de tamanho de programa foram eliminadas as opções **A**, **B**, **O**, **N**, **U** e **V**. Na opção **E** foi acrescida a possibilidade de visualizar no quadro de valores o conteúdo das variáveis de concentração **CU** (concentração obtida no cálculo por linha) e **CV** (concentração resultante do cálculo por coluna) em cada ponto da malha assim como as das batimetrias **HU** e **HV**. Pressionando a barra de espaçamento muda-se do formato de apresentação anterior do quadro contendo as variáveis **ZU**, **ZV**, **U** e **V** para este e vice-versa. Na figura abaixo é mostrado o gráfico da opção **E**, com o quadro de valores mostrando as concentrações no ponto indicado pela seta, numa simulação do modelo da Lagoa Setúbal.

No gráfico por faixas (item **Z**) foram agregadas as opções **F9** e **F10** mostrando as zonas com diferentes valores de concentração do contaminante. A figura que segue apresenta

este tipo de saída (no caso concentração de coliformes) numa execução do programa CALCULO2 para o modelo da praia de Ipanema no rio Guaíba.

Estrutura dos arquivos de saída

Os programas CALCULO1 e CALCULO2 tem os seguintes arquivos de saída:

ARQNS - arquivo destinado a armazenar os níveis registrados nos pontos escolhidos no início da execução do cálculo. Este arquivo será gerado se for selecionado pelo menos um ponto. São gravados, em cada iteração, um número de valores igual ao número de pontos selecionados no começo do cálculo. Não possui nenhum outro dado no início, sendo gravada diretamente a sequência indicada;

ARQVS - arquivo análogo ao anterior, porém destinado ao armazenamento de velocidades. São gravadas para cada ponto as componentes U e V da velocidade;

ARQTS - Tem a mesma estrutura dos dois arquivos anteriores. Em cada iteração é gravado um par de valores para cada flutuador correspondente a suas coordenadas referenciadas aos eixos do modelo e em unidades da malha. As coordenadas são gravadas a partir da iteração correspondente ao instante do lançamento.

CALCUDAT - arquivo destinado a armazenar a informação sobre as escolhas feitas no começo do cálculo. São gravados quatro números no início correspondentes ao número de paradas pré-programadas do cálculo, ao número de pontos de armazenamento de níveis, ao número de pontos de armazenamento de velocidades e ao número de flutuadores. A seguir vem três sequências: a dos números dos elementos em que são armazenados os níveis, a dos números dos elementos para os quais são gravadas as velocidades e a do tempo e coordenadas de lançamento dos flutuadores;

SA - Arquivo de salvamento; contém o valor das variáveis no momento de interrupção. Contém o número de ciclo e tempo da interrupção, a dimensão dos vetores ZU, ZV, U, V, ZVA, e ZVB. A seguir, em sequência os próprios vetores. Os vetores ZVA e ZVB contêm o maior e o menor nível registrado em cada elemento durante a execução do cálculo. No caso do arquivo ser gravado pelo programa CALCULO2, são acrescentados os vetores CU e CV de concentrações.

COMPLEMENTOS

Mudando o contorno do modelo

Muitas vezes é necessário fazer correções no contorno do modelo. Isto acontece, por exemplo, quando se pretende acrescentar ou retirar uma zona de alagamento. O procedimento poderia ser o de implementar, desde o começo, um novo modelo porém esta mecânica implicaria em repetir uma série de passos já realizados. Para evitar isto pode ser seguido o seguinte roteiro:

- a) executar o programa INICIAL tendo como arquivo de entrada o arquivo *ARQGEO* contendo a primeira versão do modelo. Na tela gráfica fazer as correções necessárias no contorno. Gravar novos arquivos *ARQGEO* e *ARQCONT* com uma extensão diferente;
- b) executar o programa MODIGEO tendo como arquivos de entrada o primeiro arquivo *ARQGEO* e o novo arquivo *ARQGEO* gravado em a). O programa transfere as batimetrias do primeiro arquivo à nova estrutura definida pelo segundo arquivo. A nova estrutura de linhas e colunas efetivas de cálculo contendo também a batimetria pode ser salva em um outro arquivo ou, o que é recomendado, no *ARQGEO* gerado em a);
- c) fazer o ajustes necessários na batimetria usando o programa GEOTEL.

Instalação do aplicativo. Operando em DOS. Operando em WINDOWS

Para instalar o aplicativo crie um diretório (por exemplo *C:\VPHA*) no qual residirão os programas e copie o disquete contendo os programas para este diretório. Agregue o nome deste diretório no comando PATH do AUTOEXEC.BAT. Para poder executar a partir do sistema WINDOWS, abra a janela, na qual será inserido o ícone, em tamanho máximo. Clique em ARQUIVO e a seguir no sub-item NOVO e aparecerá o seguinte quadro:

Digite "enter" ou clique no "OK" indicando a seleção de um "item de programa". A seguir na tela surgirá o quadro:

Propriedades do Item de Programa	
Descrição:	ipha
Linha de comando:	C:\IPHA\IPHA.PIF
Diretório de trabalho:	C:\IPHA\MODELO
Tecla de atalho:	Nenhuma
☐ Executar minimizado
<div> <div>OK</div> <div>Cancelar</div> <div>Procurar...</div> <div>Alterar ícone...</div> <div>Ajuda</div> </div>	

Preencha o espaço correspondente a "linha de comando" com o caminho e nome do diretório no qual estão os programas (C:\IPHA) e o nome do arquivo de execução *IPHA.PIF*. No item "Diretório de trabalho" escreva o nome do diretório onde deseja que estejam os arquivos usados na modelação. Clique em "Alterar ícone" e a seguir digite na linha correspondente a "Nome do arquivo" do quadro "Alterar ícone" o nome do diretório no qual estão os programas (C:\IPHA) e o nome do arquivo de ícone *IPHA.ICO*. Retorne à janela de partida pressionando duas vezes em "OK".

O sistema operacional WINDOWS tem a enorme desvantagem de degradar em forma notável a velocidade de execução de qualquer programa. Assim o tempo de execução do programa de cálculo pode aumentar mais de quinze vezes se é executado desde WINDOWS. A vantagem existente é a possibilidade de transferir as saídas gráficas de um aplicativo para outro. Recomenda-se então a execução em DOS dos programas *CALCULO1* e *CALCULO2* e, quando for necessária a transferência de uma tela gráfica os programas podem ser descontinuados (gravar o arquivo *SA* de salvamento) e retomados desde WINDOWS. Para obter um melhor desempenho em velocidade quando se estiver executando a partir do sistema DOS, o WINDOWS e o gerenciador de memória alta EMM386 não devem estar ativos.

Mudando as cores das saídas gráficas

As cores das telas gráficas podem ser mudadas pressionando a combinação "ALT-C", quando a tela está ativa. No quadro de valores aparecerá

-CORES-	
COR ATUAL:	5
NOVA COR:	7
ENTER: TROCA	

ou

-COR FAIXAS-	
COR ATUAL:	17
NOVA COR:	9
ENTER: TROCA	

O primeiro mostrador do quadro indica a cor atual do item identificado pelo primeiro número (5 ou 17 no exemplo). O segundo indica a nova cor do item caso seja digitado "enter".

A mudança de item é realizada pressionando a tecla "↑" e a seguir as teclas "←", "→". A troca de cor no segundo mostrador se processa pressionando primeiro "↓" e a seguir as teclas "←", "→". A numeração dos itens é apresentada na tabela embaixo. O número das cores atribuídas aos itens é armazenada em arquivos com o nome do programa e extensão COR. Caso não exista o arquivo (não foi feita nenhuma alteração) as cores serão as da definição original do sistema.

CORES NO PROGRAMA INICIAL

- 0 - fundo geral (fundo que aparece no quadro de valores)
- 1 - fundo sobre o qual é traçado o contorno do modelo
- 2 - interior do contorno ("água")
- 3 - contorno do modelo
- 4 - eixos coordenados
- 5 - borda do quadro de valores
- 6 - letras
- 7 - margem se foi digitalizada
- 8 - flecha para traçado do contorno
- 9 - interior da flecha do item 8
- 10 - pontos da malha no interior do contorno
- 11 - fundo (zona fora do contorno "terra") no menu final
- 12 - margem no menu final
- 13 - flecha que aponta o elemento no menu final
- 14 - interior da flecha do item 13
- 15 - pontos da malha

CORES NOS OUTROS PROGRAMAS

- 0 - fundo geral (fundo que aparece no quadro de valores)
- 1 - fundo (zona fora do contorno "terra")
- 2 - interior do contorno ("água")
- 3 - contorno do modelo
- 4 - eixos coordenados
- 5 - borda do quadro de valores
- 6 - letras
- 7 - margem, se foi digitalizada
- 8 - flecha que aponta o elemento
- 9 - interior da flecha do item 8
- 10 - malha (opção "faixas de valores")
- 11 - contorno (opção "faixas de valores")
- 12 - linha ou coluna efetiva de cálculo apontada

- 13 - livre
- 14 - livre
- 15 - livre
- 16 - 21 - faixas de valores

CORES NO CÁLCULO

- 0 - fundo geral (fundo que aparece no quadro de valores)
- 1 - fundo (zona fora do contorno "terra")
- 2 - interior do contorno ("água")
- 3 - contorno do modelo
- 4 - eixos coordenados
- 5 - borda do quadro de valores
- 6 - letras
- 7 - margem se foi digitalizada
- 8 - flecha que aponta o elemento (opção "exame dos valores calculados")
- 9 - interior da flecha do item 8
- 10 - malha (opção "faixas de valores")
- 11 - contorno (opção "faixas de valores")
- 12 - flechas (opção "graficar velocidades como setas")
- 13 - fundo de velocidades e trajetórias quando usado o zoom
- 14 - margem se foi digitalizada quando usado o zoom
- 15 - borda do gráfico de trajetórias o velocidades quando usado o zoom
- 16 - área externa ao gráfico quando usado o zoom
- 17 - contorno do modelo quando usado o zoom
- 18 - trajetórias
- 19 - área marcada nas opções A, B, N, O, U e V
- 20 - borda do quadro que seleciona a área de zoom
- 21 - 26 - faixas de valores

Acréscimos e desenvolvimentos

A simulação de um corpo de água real leva, em muitos casos, à resolução de problemas que dificilmente podem ser previstos a priori. É natural, portanto, que adaptações tenham que ser feitas nos programas. Isto não pode ser previsto no aplicativo a menos que sejam implementadas tantas opções que o transformem em algo extremamente difícil de ser usado, além de provavelmente comprometer seu desempenho. Exemplificando: foi necessário, por suas dimensões, implementar sobre a superfície da Lagoa dos Patos um campo de ventos resultante de interpolação de forma a não considerar um vento único atuando sobre toda a Lagoa em cada instante de tempo. Ao implementar o modelo do Rio da Prata foi preciso agregar modelos unidimensionais de dois grandes canais para simular os rios Paraná e Uruguai evitando o efeito de reflexão das ondas de maré na suas desembocaduras. O mesmo aconteceu com o rio Jacuí ao se modelar o estuário do Guaíba. Para estudar o transporte de contaminantes na zona da praia de Ipanema no Rio Guaíba foi necessário implementar um sub-modelo da região encaixado no modelo do Guaíba. Todos estes desenvolvimentos não foram acrescidos ao sistema pelas razões já expostas. Acreditamos sim que este sistema por sua versatilidade permite dirigir todos os esforços do usuário na resolução dos problemas específicos liberando-o de tarefas genéricas e comuns a maioria dos problemas de simulação bidimensional de estuários e lagoas.