UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

ESCOLA POLITÉCNICA

GUSTAVO DORATIOTO ALBANO

**Integração de um Modelo Matemático de Quantidade de Água
em Rede de Fluxo (ACQUANET) com um Modelo Matemático
de Qualidade de Água em Represas (CE-QUAL-R1)
Estudo de Caso: Represa Jaguari-Jacareí – Sistema Cantareira**

SÃO PAULO

2004

GUSTAVO DORATIOTO ALBANO

**INTEGRAÇÃO DE UM MODELO MATEMÁTICO DE
QUANTIDADE DE ÁGUA EM REDE DE FLUXO (ACQUANET)
COM UM MODELO MATEMÁTICO DE QUALIDADE DE
ÁGUA EM REPRESAS (CE-QUAL-R1)**

Estudo de Caso: Represa Jaguari-Jacareí – Sistema Cantareira

Dissertação apresentada à Escola Politécnica
da Universidade de São Paulo, para obtenção
do Título de Mestre em Engenharia.

Área de Concentração: Engenharia Hidráulica
Orientador: Prof. Dr. Rubem La Laina Porto

São Paulo
2004

AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Este exemplar foi revisado e alterado em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, 15 de outubro de 2004.

Assinatura do autor _____

Assinatura do orientador _____

FICHA CATALOGRÁFICA

Albano, Gustavo Doratioto

**Integração de um modelo matemático de quantidade de água em rede de fluxo (ACQUANET) com um modelo matemático de qualidade de água em represas (CE-QUAL-R1) - estudo de caso: Represa Jaguari-Jacareí – Sistema Cantareira / G.D. Albano. – ed.rev. -- São Paulo, 2004.
230 p.**

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária.

**1.Água (Qualidade) 2.Modelos matemáticos (Integração)
3.Simulação de sistemas 4.Sistemas de apoio à decisão
I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária II.t.**

FOLHA DE APROVAÇÃO

Gustavo Doratioto Albano
Integração de um Modelo Matemático de
Quantidade de Água em Rede de Fluxo
(ACQUANET) com um Modelo
Matemático de Qualidade de Água em
Represas (CE-QUAL-R1) – Estudo de Caso:
Represa Jaguari-Jacareí – Sistema Cantareira

Dissertação apresentada à Escola Politécnica
da Universidade de São Paulo, para concorrer
ao Título de Mestre, pelo curso de Pós-
Graduação em Engenharia Civil
Área de concentração: Engenharia Hidráulica.

Aprovado em ____/____/2004

Banca Examinadora

Prof. Dr. RUBEM LA LAINA PORTO _____

Instituição: _____ Assinatura: _____

Prof. Dr^a. MÔNICA FERREIRA DO AMARAL PORTO _____

Instituição: _____ Assinatura: _____

Prof. Dr. CRISTOVÃO S. FERNANDES _____

Instituição: _____ Assinatura: _____

À *Renata* e *Arlene* por simbolizarem o esforço e a dedicação para superar os obstáculos da vida. Espero poder sempre me espelhar em vocês para alcançar meus objetivos.

AGRADECIMENTOS

Aos colegas da Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo (SABESP): Carlos, Nilzo, Sérgio e Valdir (equipe de hidrologia); Armando, “Cida”, Ana Lúcia, Ana Roxo, Maurício, “Marquinho”, Edivaldo, Valter, José Mauro (equipe de qualidade de água); Álvaro (“equipe” geográfica e cartográfica); Cristina e José Marcos (equipe de apoio base).

Ao meu Orientador Prof. Dr. Rubem, à Prof^a Dr^a Mônica e ao Prof. Dr. Kamel que me auxiliaram a enxergar meus limites.

À equipe do LabSid-USP: Honório, André, Cristiano, Alexandre, Mirleia, Celimar, Arisvaldo, Silvana e Sati.

Ao Prof. Dr. Augusto José Pereira Filho, pelas orientações em meteorologia.

À colega de trabalho Rosmeiry, quem me auxiliou no desenvolvimento da interface.

À minha família pelo apoio, amizade e compreensão.

Especialmente a Andreza, minha esposa, com amor, admiração e gratidão por sua compreensão, carinho, presença e paciente apoio ao longo da elaboração deste trabalho.

E a todos aqueles que direta ou indiretamente auxiliara-me na realização deste trabalho.

RESUMO

ALBANO, G.D. Integração de um Modelo Matemático de Quantidade de Água em Rede de Fluxo (ACQUANET) com um Modelo Matemático de Qualidade de Água em Represas (CE-QUAL-R1) - Estudo de Caso: Represa Jaguari-Jacareí – Sistema Cantareira. 2004. 230 p. Dissertação de Mestrado – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo.

Desenvolveu-se uma metodologia para integração de dois modelos matemáticos, um de quantidade de água, em rede de fluxo, denominado ACQUANET com outro de qualidade de água, de uma dimensão, aplicado a represas, denominado CE-QUAL-R1. Para tanto, foi elaborada uma INTERFACE em linguagem de programação possibilitando que as vazões resultantes, simuladas pelo ACQUANET, servissem como dados de entrada ao CE-QUAL-R1 para simular a distribuição vertical das variáveis de qualidade de água em uma represa. Essa metodologia foi aplicada à Represa Jaguari-Jacareí no Sistema Cantareira em São Paulo, Brasil, como alternativa de gerenciamento quali-quantitativo, além de possibilitar o uso de retirada de água em diferentes profundidades, através da operação de tomadas d'água seletivas existentes.

Palavras-Chave: modelos de simulação, qualidade de água, quantidade de água, sistemas de suporte a decisão, integração de modelos, CE-QUAL-R1, MODSIM, ACQUANET, tomada d'água seletiva.

SUMMARY/ABSTRACT

ALBANO, G.D. **Integration of a Water Quantity Mathematical Net-Flux Model (ACQUANET) with a Water Quality Mathematical Reservoir Model (CE-QUAL-R1) - Case Study: Jaguari-Jacarei Reservoir – Cantareira System**. 2004. 230 p. Dissertação de Mestrado – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Universidade de São Paulo, São Paulo.

A methodology was developed for the integration of two mathematical models, one of water quantity in network named ACQUANET with other of water quality, in one dimension, applied in reservoirs, named CE-QUAL-R1. In order to achieve this goal, an INTERFACE was developed to link the CE-QUAL-R1 with ACQUANET outflow results. It should be highlighted that ACQUANET has been used for beginning values of CE-QUAL-R1 and to simulate the vertical distribution of water quality variables in a reservoir. This methodology was applied to Jaguari-Jacarei Reservoir, of Cantareira System in São Paulo, Brazil, as a management quality and quantity tool of the system and it showed the use possibility of withdrawal of outflowing waters from different depths, through existing selective withdrawals ports operation.

Key-words: simulation models, water quality, water quantity model, decision support system, models integration, CE-QUAL-R1, MODSIM, ACQUANET, selective withdrawals ports.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Configuração típica de um SSD.....	13
Figura 3.1 - Elos e Nós Reais e Artificiais do Modelo ACQUANET.....	61
Figura 3.2 - Tela do ACQUANET v. 2.20 com destaque do Sistema Cantareira no cenário ..	66
Figura 3.3 - Tela do ACQUANET com dados de vazão natural da Represa Jaguari-Jacareí ..	66
Figura 3.4 -Tela do ACQUANET com características físicas da Represa Jaguari-Jacareí.....	67
Figura 3.5 - Tela do ACQUANET com prioridades e volumes-meta da Represa Jaguari-Jacareí.....	67
Figura 3.6 - Tela do ACQUANET com dados gerais do cenário a ser simulado.....	67
Figura 3.7 – Tela do ACQUANET com resultados de simulação – garantia (%) de volume final no nó de represa (ex.: Represa Jaguari-Jacareí com 50 % de garantia).....	68
Figura 3.8 - Tela do ACQUANET com resultados de simulação – garantia (%) de vazões ótimas no link (ex.: Túnel 7 com 50 % de garantia)	69
Figura 4.1 – Representação geométrica de represa em camadas e mecanismos de transporte de massa	73
Figura 5.1 - Fluxograma para ativação da INTERFACE para simulação do modelo CE-QUAL-R1 com arquivos do ACQUANET. Cor amarela para procedimentos na INTERFACE	98
Figura 5.2 - Tela de entrada da INTERFACE com o formulário "frmSplash.frm"	99
Figura 5.3 -Tela de apresentação do formulário "Form1.frm" no modo CALIBRAÇÃO. No centro, fichas dos parâmetros de qualidade de água	101
Figura 5.4 - Tela de apresentação do formulário "Form1.frm" no modo 'SIMULAÇÃO'. No centro, fichas dos parâmetros de qualidade de água	103
Figura 5.5 - Tela de apresentação do formulário "Form2.frm" para escolha dos parâmetros de qualidade de água.....	108
Figura 5.6 - Tela de apresentação do formulário "Form3.frm" onde estão os parâmetros físicos de calibração do CE-QUAL-R1	109
Figura 5.7- Tela de apresentação do formulário "Form4.frm" com opção de escolha de cenários.....	111
Figura 5.8 - Tela de apresentação do formulário "Form4.frm" com a opção de escolha de resultados.....	112
Figura 5.9 - Tela de apresentação do formulário "Form6.frm" com a opção de escolha de vazões na tomada seletiva para um cenário do ACQUANET do tipo Planejamento Tático	113
Figura 5.10 - Tela de apresentação dos formulários “Form8.frm” e “Form9.frm” com escolha manual / semi-automática do perfil inicial da represa a ser simulada pelo CE-QUAL-R1	116
Figura 5.11 - Tela de apresentação do Formulário Form8.frm com a opção de escolha automática do perfil inicial da represa a ser simulada pelo CE-QUAL-R1	117
Figura 5.12 - Tela de apresentação do formulário “frmGraph.frm” com exemplo de valores observados x valores simulados	119
Figura 5.13 - Tela de apresentação do formulário “frmGraph.frm” com resultados (três arquivos simultâneos) armazenados no banco de dados para o modo Simulação	120

Figura 5.14 - Tela de apresentação do formulário "frmPer.frm" - valores médios agrupados na profundidade escolhida	122
Figura 5.15 - Tela do formulário "frmPer.frm" com a tabela mensal dos valores ordenados como Curva de Permanência dos cenários do ACQUANET simulados pelo CE-QUAL-R1	123
Figura 5.16 - Tela do formulário "frmPer.frm" - visualização do gráfico de resultados das simulações dos cenários do ACQUANET pelo CE-QUAL-R1 - "Curva de Permanência"	124
Figura 6.1 - Vista parcial da Represa Jaguari-Jacareí (barragem do rio Jaguari, saída das válvulas difusoras e vertedor)	136
Figura 6.2 - Localização da Represa Jaguari-Jacareí no Sistema Cantareira em São Paulo ..	137
Figura 6.3 - Corte da Tomada Seletiva localizada no emboque do Túnel 7.....	138
Figura 6.4 - Planta e vista frontal da tomada seletiva.....	139
Figura 6.5 - Calibração do CE-QUAL-R1 entre 23/10/90 e 23/01/92 (Temperatura - fase 01)	167
Figura 6.6 - Calibração do CE-QUAL-R1 entre 23/03/92 e 12/05/93 (Temperatura - fase 01)	168
Figura 6.7 - Calibração do CE-QUAL-R1 entre 25/05/93 e 15/12/93 (Temperatura - fase 01)	169
Figura 6.8 - Calibração do CE-QUAL-R1 entre 16/02/94 e 27/12/94 (Temperatura - fase 01)	170
Figura 6.9 - Calibração do CE-QUAL-R1 entre 14/04/95 e 13/08/97 (Temperatura - fase 02)	171
Figura 6.10 - Calibração do CE-QUAL-R1 entre 28/08/97 e 18/10/99 (Temperatura - fase 02)	172
Figura 6.11 - Calibração do CE-QUAL-R1 – comparação das fases 03, 04 (1993 a 1994) ..	173
Figura 6.12 - Calibração do CE-QUAL-R1 – comparação das fases 02, 03 e 04 (1995 e 1996)	174
Figura 6.13 - Calibração do CE-QUAL-R1 – comparação das fases 02, 03 e 04 (1997 a 1999)	175
Figura 6.14 - Vazões resultantes do ACQUANET para o Túnel 7 e para jusante da Represa Jaguari-Jacareí (Qdes+Qvert), para os cenários cant_jan, cant_abr, cant_jul e cant_out (respectivamente) com garantia ou permanência de 50 %	184
Figura 6.15 - Volumes finais simulados na Represa Jaguari-Jacareí para os cenários cant_jan, cant_abr, cant_jul e cant_out (respectivamente) com garantia ou permanência de 50 %.....	185
Figura 6.16 - Perfis de Temperatura – Situações 01, 02 e 03 (maio, agosto, novembro-1º ano)	186
Figura 6.17 - Perfis de Temperatura – Situações 01, 02 e 03 (abril, junho, dezembro-2º ano)	187
Figura 6.18 - Perfis de Temperatura – Situações 01, 02 e 03 (maio, outubro, fevereiro-1º ano)	188
Figura 6.19 - Perfis de Temperatura – Situações 01, 02 e 03 (junho, setembro, dezembro -2º ano).....	189
Figura 6.20 - Perfis de Temperatura – Situações 01, 02 e 03 (julho, outubro, fevereiro - 1º ano).....	190
Figura 6.21 - Perfis de Temperatura – Situações 01, 02 e 03 (agosto, dezembro, junho - 2º ano).....	191
Figura 6.22 - Perfis de Temperatura – Situações 01, 02 e 03 (dezembro, março, julho-1º ano)	192

Figura 6.23 - Perfis de Temperatura – Situações 01, 02 e 03 (dezembro, junho, setembro - 2ºano).....	193
Figura A.1 - Rede de Fluxo em situação inicial	214
Figura A.2 - Rede de Fluxo da Fase Primal (Situação 1).....	216
Figura A.3 - Rede de fluxo temporária da fase primal (situação 1)	217
Figura A.4 - Rede de fluxo na fase primal (situação 2).....	217
Figura A.5 - Rede de fluxo temporária na fase primal (situação 2)	218
Figura A.6 - Rede de fluxo na fase primal (situação 3).....	219
Figura A.7 - Rede de Fluxo temporária na fase primal (situação 3)	220
Figura A.8 - Rede de fluxo na fase primal (situação 4 final com solução ótima obtida)	222
Figura B.1 - Oxigênio Dissolvido (Real x Simulado) na fase 3 de CALIBRAÇÃO (1990 a 1995).....	223
Figura B.2 - Oxigênio Dissolvido (Real x Simulado) na fase 3 de CALIBRAÇÃO (1996 a 1999).....	224
Figura B.3 - pH (Real x Simulado) na fase 3 de CALIBRAÇÃO (1990 a 1992).....	224
Figura B.4 - pH (Real x Simulado) na fase 3 de CALIBRAÇÃO (1993 a 1999).....	225
Figura B.5 - Ferro Solúvel (Real x Simulado) na fase 3 de CALIBRAÇÃO (1990 a 1995). 226	
Figura B.6 - Manganês Solúvel (Real x Simulado) na fase 3 de CALIBRAÇÃO (1991 a 1995)	227
Figura B.7 - Coliformes Fecais (Real x Simulado) na fase 3 de CALIBRAÇÃO (1990 a 1995)	228
Figura B.8 - Manganês Insolúvel (Real x Simulado) na fase 3 de CALIBRAÇÃO (1996 a 1999).....	229
Figura C.1 - Temperaturas medidas nos pontos de amostragem JJ206 e JJ208 entre 1990 e 1999.....	230
Figura C.2 - Ajuste de polinômio para os dados de temperatura do ponto JJ206 no ano de 1990.....	230

LISTA DE TABELAS

Tabela 6.1 - Sistemas Produtores, Vazões Fornecidas e População Atendida na RMSP (2003)	131
Tabela 6.2 - Número máximo de horas de insolação	142
Tabela 6.3 - Valores dos Parâmetros de Qualidade simulados no CE-QUAL-R1 para o Rio Jaguari (Tributário 1 – JJ206)	152
Tabela 6.4 - Valores dos Parâmetros de Qualidade simulados no CE-QUAL-R1 para o Rio Jacaré e rio inominado (Tributário 2 – JJ208med209)	153
Tabela 6.5 - Parâmetros usados no CE-QUAL-R1 como Condição Inicial da Represa Jaguari-Jacaré	154
Tabela 6.6 - Taxas e Coeficientes adotados nas fases de calibração e simulação do CE-QUAL-R1	155
Tabela 6.7 - Parâmetros Físicos do CE-QUAL-R1 apontados no manual do modelo	162
Tabela 6.8 - Parâmetros Físicos do CE-QUAL-R1 testados/adotados na Represa Jaguari-Jacaré	163
Tabela 6.9 - Análise de Sensibilidade dos Parâmetros Físicos do CE-QUAL-R1	165
Tabela 6.10 - Características Comuns nos Cenários Simulados pelo ACQUANET	180
Tabela 6.11 - Características Específicas nos Cenários do ACQUANET incluindo Volumes Operacionais Iniciais	181
Tabela 6.12 - Características dos Cenários do ACQUANET simulados no CE-QUAL-R1	182
Tabela A.1 - Possíveis Estados de Kilter e Números de Kilter (KN) nos arcos (i,j)	211

LISTA DE SÍMBOLOS

Capítulo 3:

Q_{ij} = vazão média entre o nó i e nó j no intervalo de tempo considerado

C_{ij} = custo unitário associado com a vazão Q_{ij} representando prioridade operacional para alocação de água (fator de ponderação)

L_{ij} = vazão mínima nos arcos (i,j)

U_{ij} = vazão máxima nos arcos (i,j)

I_j = conjunto de nós cujos arcos terminam em j

O_j = conjunto de nós cujos arcos iniciam no nó j

(R) = nó de represa

(C) = nó de demanda

(I) = nó artificial de vazão afluyente e de volume inicial

(S) = nó artificial de volume a ser transportado para o período subsequente

(SP) = nó artificial de vertimento

(D) = nó artificial de demandas

(M) = nó artificial de balanço de massa

P = prioridade na situação do volume calculado

C = um número negativo que representa um benefício vinculado ao volume meta

Capítulo 4:

ρ = densidade da água (kg/m^3)

ρ_a = densidade do ar (kg/m^3)

W = velocidade do vento (m/s)

e_s = pressão de vapor de saturação na temperatura da superfície da água (mb);

e_a = pressão de vapor de saturação na temperatura do ar (mb)

C = concentração do constituinte (g/m^3)

T = temperatura da água ($^{\circ}\text{C}$)

T_d = temperatura do ponto de orvalho ($^{\circ}\text{C}$)

NDia = dia Juliano

Q = vazão (m^3/s)

A = fator que inclui efeitos dos índices químicos e biológicos de transporte os quais as concentrações são dependentes

P = fator que inclui influxo e outras transferências químicas e biológicas que são independentes da concentração

V = volume da camada (m^3)

k = índice para tributários

Q_{in} = vazão afluyente da camada (m^3/h)

C_{in} = concentração do constituinte afluyente (g/m^3)

Q_{out} = Vazão defluente (m^3/h)

D = coeficiente de difusão (m^2/h)

A = área da superfície da camada (m^2)

ΔZ = espessura da camada (m)

t = tempo (h)

Z = elevação da camada (m)

F = taxa de produção ou fonte de constituinte (g/h)

D_c = taxa de decaimento de constituinte (g/h)

Q_{ns} = radiação solar na superfície da água ($\text{kcal}/\text{m}^2/\text{s}$)

F_r = fator de reflexão

F_c = fator de cobertura de nuvens

F_s = termo de transmissão atmosférica

Q_o = incidência de radiação solar nos limites externos da atmosfera (cerca de 0.33 kcal/m²/s)

α = ângulo do sol (rad)

R = distância relativa terra-sol

a'' = coeficiente médio de transmissão atmosférica após dispersão e absorção

a' = coeficiente atmosférico médio

d = coeficiente de atenuação devido poluição

k = coeficiente de reflexão ou albedo

Q_{NA} = radiação atmosférica de ondas longas (kcal/m²/s)

T_a = temperatura do ar no bulbo seco (°C)

c = fração de cobertura de nuvem

Q_b = é a radiação de retorno (kcal/m²/s)

σ = constante de Stefan-Boltzmann

T = temperatura da superfície da água (°C)

Q_e = perda de calor por evaporação (kcal/m²/s)

L = calor latente de vaporização (kcal/kg)

ρ = densidade da água (kg/m³)

a = coeficiente empírico (m/mb-sec)

b = coeficiente empírico (1/mb)

W = velocidade do vento (m/s)

e_s = pressão de vapor de saturação na temperatura da superfície da água (mb)

e_a = pressão de vapor de saturação na temperatura do ar (mb)

T_d = temperatura do ponto de orvalho (°C)

Q_c = transferência de calor condutivo (kcal/m²/s)

$C_B = 0.61^{\circ}\text{C}^{-1}$ (taxa de Bowen)

P = pressão barométrica (mb)

d = meia-espessura da zona de influxo (m)

Q = taxa de influxo (m^3/s)

L = comprimento efetivo da represa (m)

A = área da superfície inferior da camada de influxo (m^2)

g = aceleração da gravidade (m^2/s)

$\Delta\rho$ = diferença de densidade atual entre a camada de influxo e os limites superior e inferior da zona de entrada (kg/m^3)

ρ_o = densidade da camada de entrada (kg/m^3)

Q_t = influxo da camada (m^3/h)

Q_{in} = vazão do tributário (m^3/s)

V_i = volume da camada i (m^3)

Z_{in} = volume da camada de influxo (m^3)

F_{in} = taxa de influxo de materiais (g/h)

Q_{in} = influxo da camada (m^3/h)

C_{in} = concentração dos materiais de entrada (g/m^3)

ϵ_{in} = taxa de influxo da energia térmica (kcal/h)

Q_{in} = influxo da camada (m^3/h)

T_{in} = temperatura de influxo ($^{\circ}\text{C}$)

ρ_{in} = densidade de influxo (kg/m^3)

C = calor específico ($\text{kcal}/\text{kg}/^{\circ}\text{C}$)

$C_H = 180/\theta$ coeficiente de obstrução horizontal (adimensional)

θ = ângulo de retirada horizontal (graus)

C_{Vi} = coeficiente de obstrução vertical (adimensional)

Z_1 = distância do limite de retirada superior (ou inferior) da porta (m)

Z_2 = distância do limite da retirada restrita ao limite de retirada livre (m)

Z_3 = distância da porta ao limite da retirada superior (ou inferior) imaginário (m)

$\Delta\rho$ = diferença de densidade entre a porta e o limite superior (ou inferior) da retirada (kg/m)

ρ = densidade de água na porta (kg/m)

g = aceleração da gravidade (m²/s)

b = distância da porta ao limite da retirada de interferência (m)

d = distância do limite da retirada de interferência ao limite da retirada livre (m)

Y_L = distância do limite inferior da retirada à elevação da velocidade máxima (m)

H = espessura vertical total da zona da retirada (m)

Z_L = distância do limite da retirada inferior à porta (m)

u = velocidade (m/s)

u_m = velocidade máxima (m/s)

$\Delta\rho_y$ = diferença de densidade da elevação da velocidade à elevação de velocidade máxima
(kg/m³)

y = distância da elevação da velocidade à elevação da velocidade máxima (m)

Y = distância da elevação da velocidade máxima à elevação do limite superior (ou inferior)
(m)

$\Delta\rho_m$ = diferença de densidade da elevação da velocidade máxima devido à elevação do limite
superior (ou inferior) (kg/m³)

Q = descarga sobre o vertedor (m³/s)

L = comprimento de abertura do vertedor (m)

H_w = distância vertical da superfície de água à crista do vertedor (m)

Z_o = distância vertical da crista do vertedor ao limite inferior da retirada (m)

$\Delta\rho_o$ = diferença de densidade entre a elevação da crista do vertedor e o limite inferior da retirada (kg/m^3)

ECT_W = energia cinética turbulenta do vento cortante ($\text{km}^2\text{m}^2/\text{s}^2$)

AS = área da superfície da água (m^2)

C = coeficiente empírico

W^* = velocidade de cisalhamento da água (m/s)

τ = fadiga do cisalhamento na interface ar-água ($\text{kg/m}^2\text{s}^2$)

Δt = discretização do tempo (s)

ECT_C = energia cinética turbulenta convectiva ($\text{kg}^2\text{m}^2/\text{s}^2$)

C_C = coeficiente de calibração empírico

Q_n = fluxo de calor que atravessa a interface ar-água ($\text{kcal/m}^2\text{s}$)

Z_{mix} = profundidade da região de mistura (m)

g = aceleração da gravidade (m/s^2)

α = coeficiente de expansão térmica da água ($^{\circ}\text{C}^{-1}$)

c_p = calor específico da água ($\text{kcal/kg}^{\circ}\text{C}$)

$\Phi(Z)$ = fluxo de radiação solar na profundidade Z ($\text{kcal/m}^2/\text{s}$)

Z^* = profundidade de água 0,6m abaixo da camada de superfície (m)

η = coeficiente de extinção (m^{-1})

η_w = coeficiente de extinção de água limpa (m^{-1})

k_j = coeficiente de proteção-próprio do constituinte influenciando a penetração de luz

C_j = constituintes (sólidos em suspensão, matéria orgânica particulada)

$q(I)$ = taxa de fluxo (m^3/s) na camada I

$B(I)$ = largura da camada I (m)

$\Delta Z(I)$ = espessura da camada I (m)

ρ_W = densidade da água (kg/m^3)

$\partial\rho/\partial Z$ = gradiente de densidade local (kg/m³/m)

K = constante de van Karmon (0,4)

Capítulo 6:

AN9, AN15 e A21 = número de nuvens altas lido às 9h, 15h e 21h;

MN9, MN15 e M21 = número de nuvens médias lido às 9h, 15h e 21h;

BN9, BN15 e B21: = número de nuvens baixas lido às 9h, 15h e 21h;

MA, MM e MB = média ponderada entre nuvens altas, médias e baixas;

Nuvens = cobertura de nuvens

Hss = número de horas em que não houve insolação;

HMáxs = número máximo de horas possível ao mês correspondente

Tdew = temperatura do ponto de orvalho (°C)

Tdb = temperatura do bulbo seco (°C), lido no psicrômetro da M1

Twb = temperatura do bulbo úmido (°C), lido no psicrômetro da M1

P = pressão atmosférica (mmHg), lida no barômetro da M1

eswb = pressão de vapor de saturação do ar úmido (kPa)

esdb = pressão de vapor de saturação do ar seco (kPa)

ed = pressão de vapor (kPa)

A = fator de conversão (°C⁻¹)

Vh = volume atual (10⁶m³)

Vo = volume anterior (10⁶m³)

Qn1 = soma da contribuição natural média das Represas Jaguari e Jacaréi (m³/s)

Qt7 = vazão média aduzida pelo Túnel 7 para a Represa Cachoeira (m³/s)

Qjus = soma das vazões médias descarregadas pelas válvulas difusoras das Represas Jaguari, Jacaréi e pelo Vertedor da Barragem do rio Jaguari (m³/s)

Ev1 = efeito de evaporação no rio inominado e rio Jacaré antes de 01/09/90 (m^3/s)

Ev2 = efeito de evaporação no rio Jaguari antes de 01/09/90 (m^3/s)

QJJ206F25B' = vazão natural no rio Jaguari antes de 01/09/90 (m^3/s)

QJJ208+JJ209' = vazão natural no afluente inominado e rio Jacaré antes de
01/09/90 (m^3/s)

QJJ206F25B = vazão natural no rio Jaguari após 01/09/90 (m^3/s)

QJJ208+JJ209 = vazão natural no afluente inominado e rio Jacaré após
01/09/90 (m^3/s)

QF25B = vazão lida no posto F-25B da Sabesp após 01/09/90 (m^3/s)

E = altura evaporimétrica lida em M1 (mm)

Ar = área do espelho d'água da represa (m^2)

Qn1 = soma da contribuição natural média das Represas Jaguari e Jacaré (m^3/s)

QT7:S1 = vazão captada na comporta 6 da tomada seletiva (m^3/s)

QT7:S2 = vazão captada na comporta 5 da tomada seletiva (m^3/s)

QT7:S3 = vazão captada na comporta 4 da tomada seletiva (m^3/s)

QT7:S4 = vazão captada na comporta 3 da tomada seletiva (m^3/s)

QT7:S5 = vazão captada na comporta 2 da tomada seletiva (m^3/s)

QT7:S6 = vazão captada na comporta 1 da tomada seletiva (m^3/s)

QT7:S7 = soma das vazões descarregadas pelas válvulas difusoras das Barragens Jaguari e
Jacaré (m^3/s)

Qvert = vazão descarregada pelo vertedor da Barragem Jaguari (m^3/s)

QnrPir = vazão reconstituída na seção Piracicaba (m^3/s)

QnJJ' = vazão no nó de represa Jaguari-Jacaré do modelo ACQUANET obtido diretamente das
vazões reconstituídas, descritas na 1ª e 2ª etapas (m^3/s)

QnPir' = vazão no nó de demanda Piracicaba do modelo ACQUANET (m^3/s)

JJ206TEMP = temperatura da água no rio Jaguari lida no ponto JJ206 (°C)

JJ206COLT = coliformes totais no rio Jaguari lidos no ponto JJ206 (NMP/100ml)

JJ206COLF = coliformes fecais no rio Jaguari lidos no ponto JJ206 (NMP/100ml)

JJ206CNH4 = nitrogênio amoniacal no rio Jaguari lido no ponto JJ206 (mg/l N)

JJ206PO4 = fosfato total lido no rio Jaguari no ponto JJ206 (mg/l PO4)

JJ206PH = pH lido no rio Jaguari no ponto JJ206

JJ206CNO3 = soma de nitrito e nitrato lidos no rio Jaguari no ponto JJ206 (mg/l N)

JJ208med209TEMP = temperatura da água, média entre os postos JJ206 e JJ208 (°C)

JJ208med209COLT = coliformes totais, média entre os postos JJ206 e JJ208 (NMP/100ml)

JJ208med209COLF = coliformes fecais, média entre os postos JJ206 e JJ208 (NMP/100ml)

JJ208med209CNH4 = nitrogênio amoniacal, média entre os postos JJ206 e JJ208 (mg/l N)

JJ208med209PO4 = fosfato total, média entre os postos JJ206 e JJ208 (mg/l PO4)

JJ208med209PH = pH, média entre os postos JJ206 e JJ208

JJ208med209CNO3 = soma de nitrito e nitrato, média entre os postos JJ206 e JJ208 (mg/l N)

JJ206 = ponto de qualidade de água no Rio Jaguari

JJ208 = ponto de qualidade de água no Rio Jacareí

JJ209 = ponto de qualidade de água em rio inominado

JC101 = ponto de qualidade de água na Represa Jacareí

JA101 = ponto de qualidade de água na Represa Jaguari

F25B = posto fluviométrico no rio Jaguari

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

Geral

ABCD	Santo André, São Bernardo, Santo Caetano do Sul e Diadema
EMAE	Empresa Metropolitana de Águas e Energia
ETA	Estação de Tratamento de Água
ETE	Estação de Tratamento de Esgoto
ESI	Estação Elevatória Santa Inês
ABV	Alto da Boa Vista
EEAB	Estação Elevatória de Água Bruta
EPUSP	Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
SABESP	Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo
RMSP	Região Metropolitana de São Paulo
SSD	Sistema de Suporte a Decisões
LabSid	Laboratório de Desenvolvimento de Modelos de Suporte a Decisões, do Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

CE-QUAL-R1

OD	Oxigênio Dissolvido
pH	Potencial Hidrogeniônico
SDT	Sólidos Dissolvidos Totais
SS	Sólidos em Suspensão
CMS	Coeficiente de Meia Saturação (tradução de HSC)

HSC	Half-Saturation Coefficient
M.O.	Matéria Orgânica
MOD	Matéria Orgânica Dissolvida
AA	Alimento Assimilado
AC	Alimento Consumido
P	Fósforo
N	Nitrogênio
Alg1	1ºCompartimento de Algas
Alg2	2ºCompartimento de Algas
Alg3	3ºCompartimento de Algas
ALG1	Processos de Algas
ALG2	Processos de Algas
ALG3	Processos de Algas
ALG4	Processos de Algas
ALG5	Processos de Algas
ALG6	Processos de Algas
ALG7	Processos de Algas
ALG8	Processos de Algas
PLANT1	Processos de Macrófitas
PLANT2	Processos de Macrófitas
PLANT3	Processos de Macrófitas
ZOO1	Processos de Zooplâncton
ZOO2	Processos de Zooplâncton
FISH1	Processos de Peixes
FISH2	Processos de Peixes

DECAY1	Processos de Decaimento
DECAY2	Processos de Decaimento
DECAY3	Processos de Decaimento
DECAY4	Processos de Decaimento
SSETL	Processos de Sedimentação e Adsorção
TMP	Processo com Temperatura
CHEM	Equações de Estequiometria
ANAER1	Processos Aeróbicos e Anaeróbicos
ANAER2	Processos Aeróbicos e Anaeróbicos
ANAER3	Processos Aeróbicos e Anaeróbicos
ANAER4	Processos Aeróbicos e Anaeróbicos
INIT2	1ºGrupo de Condições Iniciais da Represa (por camada)
INIT3	2ºGrupo de Condições Iniciais da Represa (por camada)
INIT4	3ºGrupo de Condições Iniciais da Represa (por camada)
INIT5	4ºGrupo de Condições Iniciais da Represa (por camada)
EXTINP	Coefficiente de Sombreamento Próprio Devido a Matéria Orgânica Particulada ($1/m \cdot \text{mg}/\ell$)
ALDIGO	Fração de Biomassa Algal Perdida por Mortalidade Não-Predatória para os Detritos
ALGAS	Equivalente Estequiométrica para Sílica para o 3ºCompartimento de Algas (% peso seco)
TPMAX	Taxa Crescimento Máximo Fotossintético ou Produção (1/dia)
TSETL	Taxa de Sedimentação Fitoplancônica (m/dia)
PS2PO4	Coefficiente de Meia-Saturação para Fósforo (mg/ℓ)
PS2N	Coefficiente de Meia-Saturação para Nitrogênio (mg/ℓ)

PS2CO2	Coeficiente de Meia-Saturação para CO ₂ (mg/ℓ)
PISAT	Intensidade Luz de Saturação na Taxa Máxima de Fotoss. (kcal/m ² *h)
TPEXCR	Taxa Máxima de Excreção ou Fotorrespiração (1/dia)
TPMORT	Taxa Máxima de Mortalidade Algal Não-Predatória (1/dia)
TPRESP	Taxa Máxima de Respiração Algal Sem Presença de Luz (1/dia)
PS2SI	Coeficiente Meia-Saturação da Sílica 3° do Compartimento de Algas (mg/l)
ALGxT1	Temperatura Mínima Limite para Metabolismo Ocorrer (°C)
ALGxT2	Temperatura Mínima onde Processos Ocorrem na Taxa Máxima (°C)
ALGxT3	Temperatura Máxima onde Processos Ocorrem na Taxa Máxima (°C)
ALGxT4	Temperatura Máxima Letal (°C)
ALGxK1	Fator de Multiplicação de Temperatura correspondente a Temperatura Mínima de Metabolismo
ALGxK4	Fator de Multiplicação de Temperatura correspondente a Temperatura Máxima Letal
TPLMAX	Taxa de Produção Máxima para Macrófitas (1/dia)
TMRESP	Taxa de Respiração Noturna Máxima para Macrófitas (1/dia)
TMEXCR	Taxa de Excreção Máxima ou Fotorespiração para Macrófitas (1/dia)
TMMORT	Taxa de Mortalidade Não-predatória Máxima para Macrófitas (1/dia)
PLDIGO(1)	Fração de Mortalidade no Tempo para Macrófitas
PLDIGO(2)	Fração de Mortalidade de Macrófitas de incremento no compartimento de Detritos
PLDIGO(3)	Fração de Mortalidade de Macrófitas de incremento no compartimento de Sedimentos
TMPMAC	Var. Máxima Temperatura Suport. em 7 dias por Macrófitas (°C)
EXTINM	Coeficiente de Sombreamento Próprio para Macrófitas (1/m*mg/ℓ)

PLIMC	HSC de Macrófitas por Limitação do Carbono Inorgânico (mg/ℓ)
PLIMN	HSC de Macrófitas por Limitação do Nitrogênio (mg/ℓ)
PLIMP	HSC de Macrófitas por Limitação de Fósforo (mg/ℓ)
PLDENS	Coeficiente Específico de Espécies da Comunidade ou Mistura (g_{seco}/m^3)
PLITE	Taxa Intensidade de Saturação de Luz na Prod. Máxima (kcal/m ² /h)
PLFRAC	Fração de Nutrientes (N e P) Obtidos da coluna d'água por Macrófitas
PLNTDEP	Profundidade Máxima de Crescimento de Macrófitas (m)
PLTT1	Temperatura Crítica Mínima de Parada do Processo de Macrófitas (°C)
PLTT2	Temperatura Mínima Ótima para Fotossíntese das Macrófitas (°C)
PLTT3	Temperatura Máxima Ótima para Fotossíntese das Macrófitas (°C)
PLTT4	Temperatura Crítica Máxima para Fotossíntese das Macrófitas (°C)
PLTK1	Fator de Multiplicação da Temperatura Crítica Mínima de Parada do Processo de Macrófitas
PLTK4	Fator de Multiplicação da Temperatura Crítica Máxima para Fotossíntese das Macrófitas
TZMAX	Taxa Máxima de Ingestão do Zooplâncton (1/dia)
TZMORT	Taxa Máxima de Mortalidade Não-Predatória de Zooplâncton (1/dia)
ZEFFIC	Eficiência de Assimilação do Zooplâncton (AA/AC)
PREF1	Fator Alimentar de Preferência pelo 1° Compartimento de Algas
PREF2	Fator Alimentar de Preferência pelo 2° Compartimento de Algas
PREF3	Fator Alimentar de Preferência pelo 3° Compartimento de Algas
PREF4	Fator Alimentar pelo Compartimento de Detritos
TZRESP	Taxa Máxima de Respiração do Zooplâncton (1/dia)
ZOOMIN	Concentração de Alimento para Início do Processo de Alimentação do Zooplâncton (g/m ³)

ZS2P	HSC do Zooplâncton sobre Algas e Detritos (mg/ℓ)
ZOOT1	Temperatura Crítica Inferior para Parada do Processo do Zooplâncton (°C)
ZOOT2	Temperatura Ótima Inferior para o Processo do Zooplâncton (°C)
ZOOT3	Temperatura Ótima Superior para o Processo do Zooplâncton (°C)
ZOOT4	Temperatura Crítica Superior ou Letal para Zooplâncton (°C)
ZOOK1	Fator de Multiplicação na Temperatura Crítica Inferior do Zooplâncton
ZOOK4	Fator de Multiplicação na Temperatura Crítica Superior do Zooplâncton
TDSETL	Velocidade de Sedimentação de Detritos (m/dia)
DETT1	Temperatura Mínima Limite para continuidade da Decomposição de Detritos (°C)
DETT2	Temperatura para Taxa Máxima de Decomposição de Detritos (°C)
DETK1	Fator de Multiplicação da Temperatura Inferior da Decomposição de Detritos (°C)
TFMAX	Taxa Máxima de Ingestão de Peixes (1/dia)
FS2FSH	Taxa de Alimento Disponível para Ingestão de Peixes
FPSED	Fator de Preferência de Peixes por Bentos e Sedimentos
FPALG(1)	Fator de Preferência de Peixes pelo 1º Compartimento de Algas
FPALG(2)	Fator de Preferência de Peixes pelo 2º Compartimento de Algas
FPALG(3)	Fator de Preferência de Peixes pelo 3º Compartimento de Algas
FPZOO	Fator de Preferência de Peixes por Zooplâncton
FPDET	Fator de Preferência de Peixes por Detritos
FISH1T1	Temperatura Crítica Inferior para a Parada do Processo de Peixes (°C)
FISH1T2	Temperatura Ótima Inferior para Processo de Peixes (°C)
FISH1T3	Temperatura Ótima Superior para Processo de Peixes (°C)
FISH1T4	Temperatura Crítica Superior ou Letal para Processo de Peixes (°C)

FISH1K1	Fator de Multiplicação sobre a Temperatura Crítica Inferior do Processo de Peixes
FISH1K4	Fator de Multiplicação sobre Temperatura Letal do Processo de Peixes
FEFFIC	Eficiência de Assimilação para Peixes
TFMORT	Taxa Mortalidade Não-Predatória para Peixes (1/dia)
TFRESP	Taxa Respiração de Peixes (1/dia)
TDOMDK	Taxa Decomposição da Matéria Orgânica Dissolvida Lábil (1/dia)
TRFRDK	Taxa Decomposição da Matéria Orgânica Refratária Dissolvida (1/dia)
TDOMRF	Taxa de Passagem da M.O. Lábil para a M.O. Refratária (1/dia)
TNH3DK	Taxa de Decaimento da Amônia (1/dia)
TDETDK	Taxa de Decaimento de Detritos (1/dia)
TCOLDK	Taxa de Decaimento de Coliformes (1/dia)
TSEDDK	Taxa de Decomposição do Sedimento (1/dia)
TNO3DK	Taxa de Denitrificação: Nitrito+Nitrato (1/dia)
DOMT1	Temperatura Inferior Limite para Decaim. da M.O. Dissolvida (°C)
DOMT2	Temperatura Mais Baixa para Decomposição Máxima (°C)
DOMK1	Fator de Mult. da Temperatura Inferior Limite para Decaimento da M.O. Dissolvida
NH3T1	Temperatura Inferior Limite para continuidade da Nitrificação da Amônia (°C)
NH3T2	Temperatura Mais Baixa para Taxa Máxima de Nitrificação (°C)
NH3K1	Fator de Multiplicação da Temperatura Inferior Limite para continuidade da Nitrificação da Amônia
NO3T1	Temperatura Inferior Limite para continuidade da Denitrificação (°C)
NO3T2	Temperatura Mais Baixa para Taxa Máxima de Denitrificação (°C)

NO3K1	Fator de Multiplicação da Temperatura Inferior Limite para continuidade da Denitrificação
TSSETL	Velocidade Sedimentação dos Sólidos Suspensos (m/dia)
ADSRBP	Coeficiente de Adsorção de Fósforo para uso na Isoterma de Lagmuir (m^3/g)
ADSRBN	Coeficiente de Adsorção de Nitrogênio para uso na Isoterma de Lagmuir (m^3/g)
ADMAXP	Quantidade Máxima de Fósforo Adsorvido por Grama de Sólido ($\text{gP} \cdot \text{m}^{-3}/\text{g}_{\text{sólido}} \cdot \text{m}^{-3}$)
ADMAXN	Quantidade Máxima de Amônia Adsorvida por Grama de Sólido ($\text{gN} \cdot \text{m}^{-3}/\text{g}_{\text{sólido}} \cdot \text{m}^{-3}$)
Q10COL	Fator de Decaimento de Coliformes em Função da Temperatura (1/dia)
O2NH3	Nº de gramas de Oxigênio para oxidar 1g de NH_4^+ a NO_3^-
O2DET	Equivalente Estequiométrico para O_2 durante Decomposição de Detritos e Sedimentos Orgânicos
O2RESP	Oxigênio requerido para Respiração Biológica
O2FAC	Equivalente Estequiométrico para Produção de O_2 na Fotossíntese
O2DOM	Equivalente Estequiométrico para O_2 na Decomposição da M.O. Dissolvida
O2MN2	Oxigênio requerido para Conversão de Manganês Reduzido a Oxihidróxido de Manganês
O2FE2	Oxigênio requerido para Oxidação do Ferro Reduzido
O2S2	Oxigênio requerido Oxidação do Sulfeto a Sulfato
OXYLIM	Conc. de Oxigênio Dissolvido que Dispara os Processos Anaeróbicos (mg/ℓ)
SEDTHK	Espessura do Sedimento Ativo para retirada de Materiais Reduzidos ou Fosfatos (cm)
TMN4ST	Taxa Sedimentação de Partículas Oxidadas de Manganês (m/dia)
TMN4RE	Taxa Redução do Manganês Solúvel Mn(IV) em (1/dia)

TMNREL	Taxa de Retirada do Manganês Insolúvel Mn^{+2} dos Sedimentos sob Condições Anaeróbicas ($g/m^2 \cdot dia$)
TMN2OX	Taxa que Mn^{+2} é Oxidado a $Mn(IV)$ em (1/dia)
TFE3ST	Taxa de Sedimentação para $Fe(III)$ particulado (oxidado) (1/dia)
TFE3RE	Taxa de Redução para $Fe(III)$ (1/dia)
TFEREL	Taxa de Retirada de Fe^{+2} dos Sedimentos sob condições anaeróbicas ($g/m^2 \cdot dia$)
TFE2OX	Taxa de Oxidação de Fe^{+2} a $Fe(III)$ sob condições aeróbicas (1/dia)
TFESAD	Taxa de Oxidação de FeS dos Sedimentos a Fe e S sob condições aeróbicas (1/dia)
TFESST	Taxa de Sedimentação de FeS na coluna d'água (m/dia)
TFESBD	Taxa de Oxidação de FeS à $Fe(III)$ na coluna d'água condições aeróbicas (1/dia)
TSO4RE	Taxa de Redução de SO_4^{-2} à S^{-2} na coluna d'água (1/dia)
TSREL	Taxa que S^{-2} é Retirado dos Sedimentos sob condições anaeróbicas ($g/m^2 \cdot dia$)
TS2OXI	Taxa que S^{-2} é Oxidado à SO_4^{-2} na coluna d'água (1/dia)
TS2DK	Taxa que S^{-2} é Perdido pela Reação com Fe^{+2} sob condições anaeróbicas (1/dia)
TXP4RE	Taxa que $PO_4^{-3}-P$ é Retirado dos Sedimentos sob condições anaeróbicas ($g/m^2 \cdot dia$)
TCNREL	Taxa $NH_4^{+}-N$ é Retirado dos Sedimentos sob condições anaeróbicas ($g/m^2 \cdot dia$)

SUMÁRIO

APRESENTAÇÃO

1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA - MODELOS DE SIMULAÇÃO DE QUALIDADE E DE QUANTIDADE DE ÁGUA.....	4
2.1 Generalidades.....	4
2.2 Modelos de Quantidade de Água em Rede de Fluxo.....	6
2.2.1 Exemplos de Modelos de Rede de Fluxo	7
2.3 Modelos de Qualidade de Água	14
2.3.1 Princípios Básicos da Modelagem de Qualidade de Água.....	15
2.3.2 Como Escolher o Modelo	24
2.3.3 Exemplos de Modelos de Qualidade	26
2.4 Integração de Modelos.....	48
2.4.1 Integração de Modelos de Qualidade e Quantidade.....	48
2.4.2 Integração de Modelos de Qualidade.....	53
2.5 Conclusões Preliminares.....	55
3. DESCRIÇÃO DO MODELO ACQUANET	57
3.1 Características do ACQUANET.....	57
3.2 Funcionamento do ACQUANET	59
3.3 Algumas peculiaridades do ACQUANET	69
4. DESCRIÇÃO DO MODELO CE-QUAL-R1	72
4.1 Principais Operações que Definem a Dinâmica do Modelo CE-QUAL-R1	77
4.1.1 Sub-rotina PDCIDE	78
4.1.2 Sub-rotina radiação (RADIATE).....	78
4.1.3 Sub-rotina de Influxos (FLOWIN)	82
4.1.4 Sub-rotinas de Fluxos de Porta, Vertedores (OUTVEL, VPORT, VWEIR).....	84
4.1.5 Sub-rotina de Camadas (LAYERS).....	87
4.1.6 Sub-rotina de Mistura (MIXING).....	87
4.1.7 Sub-rotina de Calor (HEAT).....	88
4.1.8 Sub-rotina TRNSPT	89
4.1.9 Sub-rotina RMULT	92
4.1.10 Sub-rotina INTEGR	92
4.2 Ativação Convencional do CE-QUAL-R1.....	93
4.3 Algumas dificuldades encontradas na utilização do CE-QUAL-R1	95
5. A INTERFACE - INTEGRAÇÃO CE-QUAL-R1 & ACQUANET	98
5.1 Descrição de Formulários.....	99
5.1.1 Formulário “frmSplash.frm”	99
5.1.2 Formulário “Form1.frm” (INTERFACE: CE-QUAL-R1 & ACQUANET. Parâmetros de Qualidade de Água para o CE-QUAL-R1: 1/2).....	100
5.1.3 Formulário “Form2.frm” (Parâmetros de Qualidade de Água para o CE-QUAL-R1: 2/2).....	106
5.1.4 Formulário “Form3.frm” (INTERFACE CE-QUAL-R1 & ACQUANET: Calibração)	108
5.1.5 Formulário “Form4.frm” (INTERFACE: CE-QUAL-R1 & ACQUANET - ARQUIVOS do ACQUANET para SIMULAÇÃO do CE-QUAL-R1)	109
5.1.6 Formulário “Form6.frm” (INTERFACE CE-QUAL-R1 & ACQUANET: Escolha de Vazões nas Tomadas, Descargas de Fundo e Vertedores)	112

5.1.7 Formulário “Form8.frm” (Parâmetros de Qualidade de Água: PERFIL INICIAL da REPRESA)	114
5.1.8 Formulário “frmGraph.frm” (INTERFACE do CE-QUAL-R1 & ACQUANET: Visualização de Resultados Do Banco de Dados)	118
5.1.9 Formulário “frmGraph.frm” (INTERFACE do CE-QUAL-R1 & ACQUANET: CURVA DE PERMANÊNCIA DE RESULTADOS SIMULADOS)	121
5.2 Descrição de Módulos	124
5.2.1 Módulo “modMontarCQRdat2.bas”	124
5.2.2 Módulo “modInterpola.bas”	125
5.2.3 Módulo “modLerRepresas.bas”	126
5.2.4 Módulo “modLerTributarios.bas”	127
5.2.5 Módulo “modLerCQROTP.bas”	127
5.2.7 Módulo “modMontaGrain5.bas”	128
6. ESTUDO-DE-CASO: REPRESA JAGUARI-JACAREÍ	130
6.1 Sistemas Produtores da RMSP	130
6.1.1 Sistema Rio Claro	131
6.1.2 Sistema Alto Tietê	132
6.1.3 Sistema Rio Grande	133
6.1.4 Sistema Guarapiranga	133
6.1.5 Sistema Alto Cotia	134
6.1.6 Sistema Baixo Cotia	134
6.1.7 Sistema Cantareira	135
6.2 Integração entre os sistemas produtores	135
6.3 A Represa Jaguari-Jacareí	136
6.4 Justificativa para a escolha da Represa Jaguari-Jacareí para Estudo de Caso	139
6.5 Tratamento de Dados para Uso da INTERFACE	140
6.5.1 Cobertura de Nuvens	140
6.5.2 Temperatura de Ponto de Orvalho	142
6.5.3 Vazões naturais afluentes	143
6.5.4 Vazões de Transferência, Descarregadas e Vertidas	146
6.5.5 Curva Cota-Área-Volume	147
6.5.6 Vazões naturais no modelo ACQUANET	148
6.5.7 Parâmetros de Qualidade de Água	150
6.6 As Simulações do CE-QUAL-R1 e do ACQUANET	160
6.6.1 Calibração de Parâmetros Físicos do CE-QUAL-R1	160
6.6.2 Análise das simulações com o CE-QUAL-R1 (calibração)	164
6.6.3 Resultados das simulações com o CE-QUAL-R1 (calibração & validação)	165
6.6.4 CONCLUSÕES PRELIMINARES – Calibração do CE-QUAL-R1	176
6.6.5 As Simulações do CE-QUAL-R1 com cenários do ACQUANET	179
7. CONCLUSÕES	196
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	200
ANEXO A – O Algoritmo OUT-OF-KILTER (OOK)	209
A.1 Funcionamento do algoritmo OUT-OF-KILTER (OOK)	209
A.1.1 Fase Primal do OOK	212
A.1.2 Fase Dual do OOK	212
A.2 Exemplo de aplicação do algoritmo OUT-OF-KILTER	213
ANEXO B – Parâmetros de Qualidade Simulados (fase 3 de CALIBRAÇÃO)	223
B.1 Oxigênio Dissolvido	223
B.2 pH	224
B.3 Ferro Solúvel	226
B.4 Manganês Solúvel	227
B.5 Coliformes Fecais	228
B.6 Manganês Insolúvel	229
ANEXO C – Visualização e Exemplo de Ajuste de Dados dos Afluentes	230

APRESENTAÇÃO

Muitos são os caminhos para o desenvolvimento de uma dissertação ou tese. A escolha coerente não é aquela que atenda aos anseios pessoais do autor ou orientador, mas sim aquela que poderá servir de ponto de partida para o desenvolvimento de um assunto, esteja ele ou não na atualidade, ou que sirva de continuidade para outro. E não apenas isso, mas escolher um tema que possa ser colocado em prática, academicamente ou profissionalmente, logo após a conclusão dos trabalhos é ainda uma tarefa mais difícil. Neste caso, vale a experiência profissional e acadêmica do autor, adquirida ao longo da pesquisa bibliográfica, das aulas assistidas ao longo do período da pós-graduação e, em certos casos, a experiência adquirida conjuntamente no cotidiano profissional. Fundamental também para desenvolvimento de um tema é a experiência profissional e acadêmica do orientador.

No campo da engenharia civil, atualmente, diversas são as áreas para a iniciação científica. O interessado na carreira acadêmica conta com a existência de temas voltados para aeroportos, estruturas, transportes, administração de empresas, ciências ambientais, hidráulica, dentre outras. Na área de hidráulica, especificamente na EPUSP, existe a subdivisão nos seguintes assuntos: obras hidráulicas fluviais e marítimas, saneamento básico e recursos hídricos e, meio ambiente.

Para escolha do tema na área de recursos hídricos e meio ambiente, foram feitas várias considerações pelo autor e orientador, as quais destacam-se:

1. A atual situação que se encontra o Brasil em termos de abastecimento de água e a crescente demanda por esse recurso natural escasso. Pesquisas já mostraram que apesar do Brasil ser

uma das maiores reservas de água doce do mundo, o seu acesso depara-se com a situação espacial do recurso frente à localização da concentração da população. Isto torna a alocação do recurso, através de instrumentos legais e de medidas técnico-operacionais para os diversos tipos de uso (abastecimento, agricultura, indústria, geração de energia elétrica, lazer e turismo), desigual entre os estados e/ ou regiões e de difícil decisão.

Vale ressaltar que cidades fortemente urbanizadas como São Paulo, cujo crescimento se deu e ainda se dá de forma rápida, não são facilmente controlados, bastando atentar para dados de população cujo crescimento foi de 15,75 % na última década (1991-2000) atingindo o montante de 17,879 milhões de pessoas¹, implicando na crescente demanda por água, frente a baixa e permanente disponibilidade hídrica per capita natural (200 m³/hab/ano) da bacia em que se insere (Bacia do Alto Tietê);

2. O estado de conservação que se encontram os recursos hídricos (represas de abastecimento e rios afluentes), em especial aqueles abrangidos pelas regiões mais urbanizadas, sofrendo impacto com o lançamento de esgotos *in natura* e de efluentes industriais sendo despejados sem tratamento, deposição de lixo domiciliar e captações irregulares, decorrência do sistema de fiscalização deficitária;

3. A situação em que, simultaneamente, existem as necessidades de se efetuar a captação de água de boa qualidade em um ponto de uma bacia hidrográfica e, a necessidade de se lançar esgotos a jusante, interferindo na qualidade da água de outras captações próximas, pois por mais avançadas que sejam as técnicas existentes, dificilmente em termos técnico-econômicos se consegue valores acima de 95 % de eficiência de sistemas de tratamento de esgotos;

¹ Fonte: IBGE , Censos Demográficos (2000).

4. As ações de uso e ocupação do solo que são implementadas numa bacia hidrográfica, como instalação de indústrias, implantação de loteamentos, construção de novas estradas, entre outros, sem a realização de estudos prévios e ferramentas (modelos) à altura para avaliação de impactos ambientais sobre o meio e, principalmente, sobre as águas superficiais, atendendo muitas vezes condições que não são as mais adequadas tecnicamente.

5. Ainda é de pouca expressão no Brasil o uso de softwares (modelos matemáticos) destinados à qualidade e /ou à quantidade de água, seja na operação, controle e /ou planejamento de sistemas produtores de abastecimento público;

6. O conhecimento de que é a população quem muitas vezes sustenta as pesquisas de mestrado e doutorado nas instituições públicas, merecendo o devido retorno.

Com este cenário, dentre as disciplinas ou assuntos da subárea de recursos hídricos e meio ambiente, optou-se pelo desenvolvimento do assunto “gerenciamento de recursos hídricos”. Sendo esse um assunto que contempla diversos outros, foram incorporados ao tema do presente trabalho: ‘a aplicação da modelagem matemática de qualidade de água conjuntamente com a de quantidade de água’.

Seguindo a linha de trabalho adotada entre a USP e a Cia. de Saneamento Básico do Estado de São Paulo – SABESP, na qual uma experiência obteve sucesso no trabalho conjunto para desenvolvimento de um software denominado Sistema de Suporte à Decisão para Operação dos Grandes Sistemas Produtores (SSD-Sabesp), atualmente em operação por diversos usuários internos e externos à empresa e em contínuo desenvolvimento pela POLI-USP², é

² Trabalho realizado na Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (POLI-USP) através do Laboratório de Sistemas de Suporte à Decisões (LabSid).

desejo do autor que futuramente o presente trabalho possa servir como ferramenta ou possa auxiliar no desenvolvimento de novas ferramentas para utilização em sistemas semelhantes, sejam eles destinados a qualquer tipo de uso dos recursos hídricos.

1. INTRODUÇÃO

As finalidades dos recursos hídricos abrangem, em síntese: geração de energia elétrica, recreação, irrigação, lazer, esporte e abastecimento público (uso de mananciais). Um dos mais difíceis problemas de serem solucionados no mundo é o atendimento da demanda por água para abastecimento público frente à escassez dos recursos hídricos, seja em termos de quantidade ou qualidade, ocasionando um crescente conflito na alocação dos corpos hídricos superficiais, principalmente nas regiões de maior concentração populacional.

Para minimização desses conflitos a legislação brasileira previu a criação dos comitês de bacia hidrográfica composto pela sociedade civil organizada, representantes de órgãos estaduais e municipais, onde são discutidas as questões referentes às outorgas, planos de bacias, saneamento básico (captação e tratamento de água; coleta, afastamento e tratamento de esgotos) e problemas de disponibilidade hídrica superficial e subsuperficial em termos qualitativos e quantitativos. E esta é, sem dúvida, uma das questões de maior relevância, principalmente nos períodos de forte estiagem.

Para auxílio nas tomadas de decisões os atores envolvidos na gestão de recursos hídricos podem contar com o emprego de ferramentas denominadas “sistemas de suporte à decisões”. Em geral são compostos por uma base de dados de campo armazenados periodicamente (banco de dados), modelos matemáticos (softwares) que simulem situações (cenários) e prevejam situações futuras de qualidade de água e/ou de quantidade de água em uma represa

ou ao longo de um trecho de um rio, apresentando resultados de forma estatística (probabilidade). Os modelos matemáticos têm como finalidade a simulação e/ou a otimização de um processo de produção ou controle, seja ele de energia hidrelétrica ou de produção de água para abastecimento público, para assim obter-se a melhor forma de operação dentro de uma bacia hidrográfica ou dentro de um sistema de bacias conectadas. Tais modelos podem funcionar separadamente ou de forma integrada, isto é, simulando quantidade e qualidade de água simultaneamente, dando suporte à tomada de decisão quanto às vazões que podem ser liberadas ou captadas em um curso d'água.

Alguns modelos matemáticos utilizados para gerenciamento de recursos hídricos genericamente têm como principal função-objetivo o atendimento a determinadas demandas quantitativas de água; outros modelos têm como função-objetivo o atendimento a demandas qualitativas; mas, modelos matemáticos cuja função objetivo atenda condições qualitativas e quantitativas de forma integrada ainda é de rara ocorrência.

Dentro de bacias hidrográficas complexas, com grande diversidade de usuários e conflitos, o gerenciamento quali-quantitativo é necessário para manutenção ou melhoria dos cursos d'água, lagos e represas, cujas modificações sofridas ao longo do tempo envolvem aspectos físicos, químicos e biológicos, citando-se problemas de estratificação térmica, oscilações de pH, turbidez, cor, oxigênio dissolvido, demanda química e bioquímica de oxigênio, condutividade, quantidade de nitrogênio amoniacal dissolvido, dentre outros.

No decorrer do desenvolvimento do presente trabalho procurou-se atender aos seguintes objetivos:

- desenvolvimento de uma metodologia, na forma de uma INTERFACE computacional, que pudesse usar dois modelos matemáticos (softwares) com a capacidade de simular quantidade e qualidade de água em uma represa de forma integrada;
- revisar os atuais modelos matemáticos disponíveis no meio acadêmico e/ou comercial, adotando-se aqueles que mais se adequassem: ao tipo e volume de dados disponíveis, ao ambiente de programação dos modelos, ao nível de dificuldade de manuseio e integração, forma de armazenagem de resultados simulados possibilitando sua utilização prática em um caso real;
- aplicação da interface ou metodologia retro em um caso real (estudo de caso);
- análise dos resultados simulados pelo modelo de quantidade e pelo de qualidade de água e verificar possíveis aplicações práticas;
- análise de viabilidade da aplicação de tomadas seletivas com o uso do modelo de qualidade de água.

O trabalho foi estruturado da seguinte forma: (Capítulo 2) revisão bibliográfica com os principais conceitos e exemplos de modelos matemáticos de quantidade e de qualidade de água; (Capítulo 3) descrição do modelo de quantidade de água utilizado no trabalho (ACQUANET); (Capítulo 4) descrição do modelo de qualidade de água utilizado no trabalho; (Capítulo 5) descrição da interface e metodologia desenvolvida para integrar ambos os modelos; (Capítulo 6) a aplicação da interface a um caso real; (Capítulo 7) conclusões do trabalho e; Anexos.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA - MODELOS DE SIMULAÇÃO DE QUALIDADE E DE QUANTIDADE DE ÁGUA

Para realização do presente trabalho procurou-se rever alguns modelos matemáticos de qualidade e de quantidade de água disponíveis para aquisição, conceitos relativos à formulação e à escolha dos modelos conforme a necessidade de aplicação.

2.1 Generalidades

Todas as decisões gerenciais que envolvam problemas de qualidade de água devem ser embasadas em dados reais, cuja precisão seja razoável, confiável e praticável. Um programa de gerenciamento não pode ser desenvolvido sem o conhecimento das taxas de fluxo, da variação temporal do fluxo, da demanda por água, dos poluentes ou contaminantes da água, dos custos de operação e tratamento dentre outros fatores e parâmetros (Schroeder, 1987).

Modelos de simulação são modelos matemáticos cujas técnicas permitem representar alternativas propostas e simular condições reais que poderiam ocorrer dentro de uma faixa de incertezas, inerentes ao conhecimento técnico científico. (Tucci, 1998).

Segundo Azevedo et al. (1997), a crescente complexidade do gerenciamento de recursos hídricos, tanto no planejamento como na solução de conflitos por água em qualidade e

quantidade, tem necessitado do emprego de técnicas e instrumentos capazes de auxiliar na tomada de decisão dos técnicos direta ou indiretamente responsáveis por sua operação.

Uma das ferramentas utilizadas na gestão de recursos hídricos é a modelagem matemática, seja de quantidade ou de qualidade de água. Um modelo matemático consiste da resolução de uma única equação ou um conjunto de equações matemáticas formuladas para representar um processo natural ou artificial. O processo de modelagem, de forma geral, envolve o conhecimento:

- do fenômeno a ser estudado;
- do problema a ser resolvido;
- da abstração (uma simplificação do problema);
- dos objetivos, restrições e critérios de solução que devem ser declarados;
- da definição e a formulação do modelo com a escolha das equações que descrevem o processo e algoritmos de solução;
- da verificação do modelo quanto à lógica de cálculo e formulação das equações;
- da calibração do modelo (comparação entre o processo modelado e o real);
- da avaliação do modelo para um possível refinamento;
- da análise de sensibilidade (identifica e aprimora o nível de precisão do modelo);
- da validação (comparação entre o processo modelado e um novo conjunto de dados reais);
- da simulação propriamente dita.

Antes do emprego de um modelo matemático é preciso definir qual o possível modelo a ser usado, principalmente se houver necessidade de aquisição de um modelo comercial (software) necessitando de um custo inicial de investimento; se há pretensão de se desenvolver um modelo, então será necessário formular um fenômeno a ser estudado. Uma das formas de se

avaliar a possibilidade de uso de um modelo é fazer um levantamento preliminar dos dados de entrada necessários para seu funcionamento e o volume de dados disponível.

Os resultados de uma modelagem numérica, de uma situação real presente, podem indicar as formas de se melhorar a operação e monitoramento de um sistema e estabelecer seguramente, mas de maneira ampla, as cargas de entrada mais representativas, servindo também de ferramenta para planejamento da ocupação futura do solo pela atividade humana a partir da análise de possíveis cenários. Deve-se considerar ainda a relação concomitante entre o gerenciamento do ambiente aquático e o desenvolvimento sustentável com o problema da escassez dos recursos hídricos para melhoria das condições ou tendências futuras (Hansen, 1996).

A seguir são descritos e citados alguns modelos de quantidade de água e de qualidade de água e sua integração.

2.2 Modelos de Quantidade de Água em Rede de Fluxo

Com relação à quantidade de água, um modelo de simulação pode ter o seguinte funcionamento:

- entrada de dados controláveis ou variáveis de decisão (ex.: volume operacional de uma represa, vazões de entrada e saída) e dados não-controláveis (ex.: geometria de uma represa, vazões naturais afluentes);
- aplicação das equações (ex: continuidade) com atendimento à descrição do sistema (equação do sistema), às restrições (ex.: vazões mínimas e máximas, volumes mínimos e máximos armazenados) e à política de operação;

- saídas (volumes armazenados, vazões descarregadas, de retirada e de transferência) na forma de gráficos ou tabelas descrevendo as frequências de falha e de atendimento;
- tomada de decisão do operador face a resposta do modelo ou nova simulação com variação de cenários.

Uma das técnicas utilizadas na gestão de recursos hídricos é a simulação matemática através de modelos de rede de fluxo.

A simulação matemática tem como principal vantagem a flexibilidade em representar sistemas simples e sistemas complexos na forma de modelos computacionais. A modelagem em rede de fluxo permite a tomada de decisão através de um conjunto de soluções viáveis que podem ser otimizadas por técnicas específicas.

Em geral, os modelos de simulação de rede de fluxo formam um conjunto de nós (nodes) e arcos (ou links). Nos sistemas de recursos hídricos os nós representam represas, demandas de cidades, de indústrias e da agricultura, dentre outros pontos importantes do sistema; os arcos são as conexões entre os nós formados por adutoras, canais, túneis e trechos naturais ou artificiais de rios.

De maneira geral, cada link tem um limite inferior, um superior (ex.: vazões mínimas e máximas de transferência) e um custo de passagem, fixado pelo usuário; os nós têm um limite superior e um inferior (níveis mínimos e máximos de represas).

2.2.1 Exemplos de Modelos de Rede de Fluxo

Dentre os modelos de rede de fluxo, pode-se citar os seguintes:

MODSIM

Criado por John W. Labadie, o MODSIM é um dos modelos utilizados na gestão de recursos hídricos. Numa versão anterior utilizando um algoritmo de programação linear primal-dual (variação do método simplex) denominado **Out-of-Kilter** – OOK (Ford e Fulkerson, 1962³ apud Solis e Jansen, 2002), especificamente criado para solução de problemas de minimização de custos em redes de fluxo, o MODSIM fazia e, na versão atual (**ACQUANET**⁴), ainda faz a simulação e a otimização de rede de fluxo em uma bacia hidrográfica em períodos de tempo (horizonte de planejamento) definidos pelo usuário. O modelo é apresentado no Capítulo 3.

AQUATOOL

Desenvolvido na Espanha, o AQUATOOL é um conjunto de ferramentas formado basicamente pelos seguintes modelos: um modelo de simulação de bacias - SIMWIN, um modelo de otimização de bacias - OPTWIN e um modelo de simulação de aquíferos - AQUIVAL (Andreu et al., 1996).

Semelhante ao MODSIM e ao ACQUANET, o SIMWIN simula mensalmente as vazões e volumes transportados em uma bacia hidrográfica através de arcos ou elos, representando cursos d'água ou estruturas hidráulicas (como túneis, rios ou canais), que se conectam a nós

³ FORD e FULKERSON. *Flows in Network*. 1962

⁴ ACQUANET é a denominação atual dada ao MODSIM após adaptações feitas no código pelo Laboratório de Sistemas de Suporte à Decisões (LabSid) situado na Escola Politécnica da USP.

que representam: represas, demandas (consuntivas ou não) e passagens (confluência de cursos d'água) formando uma rede de fluxo conservativa.

O SIMWIN funciona como um gerenciador de cenários simulados. A rede é otimizada com o modelo OPTWIN que, utilizando o algoritmo Out-Of-Kilter (OOK), estabelece os melhores volumes a serem armazenados nas represas, retirados pelas demandas ou liberados pelos elos, atendendo assim os custos e prioridades pré-estabelecidos pelo usuário. O funcionamento do OOK está descrito no Anexo A.

RIVERWARE

Definido como uma “ferramenta generalizada para modelagem de sistemas de represas complexos”, o modelo foi desenvolvido pela University of Colorado's Center for Advanced Decision Support for Water and Environmental Systems - CADSWES juntamente com a Tennessee Valley Authority - TVA e o U.S. Bureau of Reclamation USBR (Zagona et al., 2001; Castro, 2003).

Semelhante ao ACQUANET e ao AQUATOOL, uma bacia hidrográfica pode ser desenhada graficamente na tela onde cada objeto possui algoritmos pré-programados para processos físicos como balanço de massa; são ligados a estruturas de dados denominadas “slots” que contêm informações como vazões de entrada e equação cota-área-volume, dentre outras. O usuário representa a topologia da bacia através de links que se conectam aos “slots” dos objetos formando a rede de fluxo.

É permitido ao usuário escolher, por exemplo, qual algoritmo para o cálculo de evaporação será usado em determinada represa. O modelo permite a simples simulação de um balanço-de-massa de uma represa a partir de uma vazão de retirada desejada pelo usuário. Além disso, o modelo atende a um conjunto de regras operacionais através de uma linguagem específica conhecida como “programação orientada-objeto” similar às funções “Macro” de uma planilha de computador, acionada por um editor de paletas gráficas.

Semelhante ao ACQUANET e ao AQUATOOL, a otimização da rede é feita pelo modelo atendendo-se aos objetivos por ordem de prioridade, começando com a maior e avançando até a menor, através de uma técnica denominada “programação objetivo preemptiva⁵ linear” (Can e Houck, 1984⁶; Loganathan e Bhattacharya, 1990⁷ apud Zagona et al., 2001); as restrições são traduzidas em programação linear.

CALSIM

Desenvolvido pelo California State Department of Water Resources e semelhante ao AQUANET e ao AQUATOOL, o CALSIM, versão atualizada dos modelos DWRSIM e PROSIM, representa um sistema de recursos hídricos através de represas e canais em uma rede de fluxo composta respectivamente por nós e elos.

⁵ Sistema operacional capaz de alternar entre os programas em execução sem depender da sinalização destes.

⁶ CAN, E.; HOUCK, M. Real-Time Reservoir Operations by Goal Programming. Journal of Water Resources Planning and Management. ASCE, Vol. 110, N°3, p.297-309, 1984.

⁷ LOGANATHAN, G. V.; BHATTACHARYA, D. Goal-Programming Techniques for Optimal Reservoir Operations. Journal of Water Resources Planning and Management. ASCE, Vol. 116, N°6, p. 320-838, 1990.

É utilizado para resolver problemas de alocação de água em uma bacia hidrográfica com base em regras operacionais definidas pelo usuário. Em cada nó podem ser simulados diversos aspectos físicos o que inclui entradas e saídas de água, fluxos vindo de outros nós, além de água proveniente ou destinada ao subsolo; podem ser definidos os limites sazonais de armazenagem operacional de represas (níveis mínimos e máximos operacionais) ou fluxos máximos e mínimos de entradas e saídas. A simulação pode ser feita de forma contínua ao longo de vários anos.

A função-objetivo descreve a prioridade na qual a quantidade de água deve ser distribuída na rede. O modelo maximiza uma função-objetivo linear a cada período de tempo obtendo-se a solução ótima (fluxos e armazenamento) que satisfaça todas as restrições lineares impostas.

Na versão anterior (PROSIM) simulava no Central Valley Project a operação das Represas de Folsom, Trinity, San Luis, Whiskeytown, e Shasta/Keswick, Lago Natoma, túneis de Spring Creek e Clear Creek, estações elevatórias de Tracy e Contra Costa. No State Water Project foi usado para simular as represas de Oroville, San Luis, East Branch e West Branch, Estação Elevatória de Banks (WFPE, 1998).

AQUARIUS

Apresentado em 1997, o modelo é definido por seus autores como um modelo de computador direcionado à alocação temporal e espacial da quantidade do fluxo de água demandada de forma competitiva por diversos usos em uma bacia hidrográfica, que utiliza o conceito de custo econômico-financeiro atribuído à água (Diaz et al., 2002).

Por um critério de eficiência econômica, o modelo aloca os fluxos em uma rede, sujeitos a restrições específicas, até que o retorno econômico marginal da rede em todos os usos seja igual. Tal igualdade acontece, pois se diferentes custos marginais e curvas de demanda são descendentes, um uso de custo maior pode teoricamente ter um poder de compra maior frente a um uso de custo inferior, pagando-se um preço que excede o valor da água do uso inferior. A transferência do uso de custo menor para o uso de custo maior é feita até que haja um ponto ótimo, isto é, até que haja igualdade entre os custos marginais.

Cada uso possui uma curva de demanda e uma curva de benefício marginal, indicando um preço máximo que um usuário está disposto a pagar por cada unidade de água. Custos referentes a bombeamento de água subterrânea e controle de cheia entram como benefícios negativos na formulação. A função-objetivo não-linear do modelo é maximizar a soma de todos os benefícios econômicos entre os usos de água.

Além destes, citam-se ainda os seguintes modelos de rede de fluxo: **CRAM** (Central Resource Allocation Model) do Hydrosphere, Inc.; **HEC-PRM** do Hydrologic Eng. Center; **SIMYLD-II** do Texas Water Development Board (Barros, 2003).

De maneira genérica, os modelos de rede fluxo descritos configuram-se como ferramentas importantes para o gerenciamento dos recursos hídricos superficiais e subterrâneos. Tais modelos juntamente com uma interface gráfica computacional que se conecta a eles para sua ativação, que se conecta aos dados de entrada (vazões naturais) e de saída (resultados de fluxos liberados ou armazenamentos) ou que se conecta a outros modelos para simulação de outros fenômenos (como evaporação, geração de séries sintéticas etc.) a fim de auxiliar na

tomada de decisão de um usuário, configuram-se no que se conhece como “Sistemas de Suporte a Decisões” ou SSD.

A configuração típica de um SSD (Castro, 2003) está ilustrada na figura a seguir:

Figura 2.1 - Configuração típica de um SSD

Os SSD constituem uma metodologia de auxílio à tomada de decisões baseadas na intensa utilização de bases de dados e modelos matemáticos. Além disso, caracterizam-se pela facilidade com que propiciam o diálogo entre o usuário e o computador (Porto et al., 1998).

A respeito de SSD, segundo Castro (2003):

[...] quando se dispõe de um SSD, o usuário conta com um instrumento potente para auxiliá-lo a dispor de informações, a identificar e formular problemas, a conceber e analisar alternativas e, finalmente, a ajudá-lo na escolha do melhor curso de ação. Em outros termos, a finalidade de um SSD não é tomar decisões, mas auxiliar a missão de decidir.

2.3 Modelos de Qualidade de Água

A respeito do objetivo de um modelo matemático de qualidade, Tucci (1998) aponta que:

[...] o modelo matemático de qualidade de água deve ser visto como um auxiliar valioso para simular alternativas apontadas pelos planejadores e questionadas pela população. O conhecimento do comportamento dos processos envolvidos e simulados pelos modelos é essencial, para que as alternativas e os resultados sejam representativos e possam ser corretamente avaliados.

Segundo Mahamah (1998) “modelos de qualidade de água são abstrações simplificadas dos processos físicos, químicos e biológicos no ecossistema aquático” e a simplicidade do desenvolvimento e boa aplicação são atributos que contribuem para o uso substancial dos modelos.

Quanto à modelagem de qualidade de água, Dahl e Wilson (2000) apontam que:

[...] a modelagem da qualidade de água é uma tarefa complexa e interdisciplinar que necessita tratar de fenômenos físicos muitas vezes não compreendidos totalmente, que usualmente dispõe de dados esparsos no tempo e no espaço; são de precisão não confiável sob um domínio tridimensional e objetivam satisfazer usuários diferentes com muitas prioridades diferentes.

Segundo Straskraba e Tundisi (2000), utilizam-se modelos matemáticos no gerenciamento da qualidade da água de represas com os seguintes objetivos:

- prever possíveis situações referentes à qualidade da água, quando as condições ambientais das bacias hidrográficas forem alteradas por atividades antrópicas;
- fornecer estimativas que permitam a tomada de decisões sobre diferentes opções de gerenciamento num horizonte de longo prazo;
- apoiar decisões de gerenciamento em curto prazo que digam respeito à qualidade da água;
- otimizar as campanhas de coleta de amostras e o controle da qualidade da água.

Segundo Dahl and Wilson (2000), para a modelagem da qualidade é necessário definir o horizonte de tempo e o tempo de resolução inerentes ao atendimento satisfatório de um

objetivo. Deve-se considerar o nível de precisão do modelo, obtido em função da precisão dos dados disponíveis, da complexidade do modelo matemático utilizado e da sofisticação da solução numérica.

2.3.1 Princípios Básicos da Modelagem de Qualidade de Água

Os tipos de modelos de qualidade de água disponíveis quanto à forma de solução, segundo Dahl e Wilson (2000) são:

- modelos de estado (uniforme): envolvem equações algébricas e são usados para aplicações onde a dinâmica do sistema (lago ou represa) não é muito rápida e nem muito pequena quando comparada com a escala de tempo de interesse;
- modelos dinâmicos: incorporam derivadas envolvendo equações temporais e espaciais;
- modelos de caixa preta são formulados com base em correlações matemáticas: utilizam uma série longa de dados para apresentar uma boa resposta, sem conhecimento prévio do problema modelado e, portanto sem a necessidade de um significado físico;
- modelos de princípios teóricos (entradas-saídas): utilizam-se de leis e equações científicas formando a base do modelo. Parâmetros desconhecidos são calculados estaticamente de forma a se obter resultados compatíveis entre os valores simulados e os reais;
- modelos de tempo contínuo: utilizando equações diferenciais para aplicação das equações de conservação; são a melhor forma de representar fenômenos de qualidade de água;
- modelos de tempo discreto.

Os principais fatores e mecanismos que influenciam a qualidade de água em represas são:

2.3.1.1 Fatores Físicos

Hidrodinâmica:

A hidrodinâmica é afetada principalmente pelo fluxo de entrada, tensões de cisalhamento na superfície de contorno, aceleração da rotação da Terra (força de Coriolis), correntes geradas pela ação do vento, variações de densidade em função da variação de temperatura (Tundisi e Eiger, 1998).

Segundo Porto (1991), quando no meio líquido, um constituinte sofre ação dos seguintes processos:

- advecção: processo de transporte pelo campo de velocidades do meio fluido onde em represas é determinado pelas vazões de entrada e saída e pelo movimento da água causado pelo vento;
- difusão molecular: massa ou energia é transferida através de movimento aleatório das moléculas do fluido, diminuindo-se a concentração sem a movimentação do fluido;
- difusão advectiva: é a soma dos processos de advecção e difusão molecular;
- difusão turbulenta: movimento do fluido em regime turbulento;
- dispersão: espalhamento das partículas induzido pelo gradiente de velocidades sendo, portanto, a soma do perfil de velocidades e da difusão;
- convecção: movimento do fluido em função da alternância de densidades

Interação com a camada sedimentar: sedimentação, ressuspensão, redissolução, advecção intersticial e difusão intersticial;

Temperatura: ocorre variação da densidade em função da variação da temperatura; a temperatura influencia a concentração de constituintes alterando taxas de reações químicas, taxas de natalidade e mortalidade de seres vivos; a temperatura altera a concentração de gases.

Temperaturas distintas e, portanto, densidades distintas entre a camada superficial (*epilímnio*: camada quente, turbulenta e de temperatura uniforme) e a camada profunda (*hipolímnio*: camada mais fria com baixa turbulência) de uma represa, variando ao longo da estação do ano, definem o fenômeno de *estratificação térmica*. A camada intermediária ou de transição é denominada de *metalímnio* e contém a *termoclina* que é o plano imaginário que passa pelo ponto de máximo gradiente de decréscimo da temperatura (Porto, 1991).

Numa represa estratificada o local de produção de oxigênio é o epilímnio; o local de consumo de oxigênio é o hipolímnio. Na ocasião de mistura da represa, a concentração de oxigênio tende a acompanhar a isoterma da coluna d'água (Porto, 1991).

Entrada de Constituintes: concentrações variáveis no tempo alteram a concentração de constituintes numa represa.

Funções de Força: fluxos de entrada e saída, vento, radiação solar, cobertura de nuvens, temperatura do ar podem afetar a hidrodinâmica do meio e a cinética de várias reações químicas:

Segundo Porto (1991):

- O aquecimento e o resfriamento induzidos na represa (trocas de calor na interface ar-água) afetam: (a) o regime de mistura pela adição ou remoção de calor que alteram a densidade da água e (b) durante o resfriamento provocam a mistura convectiva;
- O vento gera um atrito na superfície ar-água transmitindo energia para a superfície líquida, sendo parte utilizada para a formação de ondas de superfície e parte para formação de correntes de circulação e formação de turbulência;
- A vazão afluyente se acomodará na camada cuja densidade for similar à sua. Fluxos mais densos se acomodarão em profundidades maiores provocando correntes de fluxo vertical; fluxos menos densos formarão correntes superficiais. Em ambas situações ocorrerá mistura em função da turbulência.
- A vazão efluente gera corrente de circulação contribui para a alteração do regime de mistura da represa devido à turbulência introduzida.

- Equação de estado: relaciona a concentração de determinados constituintes e a temperatura com a densidade do meio aquático

2.3.1.2 Fatores Físico-Químicos

Reações químicas sofridas por algumas substâncias podem alterar sua concentração. Os principais processos físico-químicos que afetam a concentração das substâncias são: sorção, volatilização, sedimentação, ionização, precipitação, dissolução, hidrólise, fotólise, oxidação e redução (Tundisi e Eiger, 1998).

2.3.1.3 Fatores Bioquímicos

Os principais processos que afetam a qualidade da água são a biodegradação da matéria orgânica e a eutrofização. A presença de algas, por exemplo, pode alterar a turbidez e; a presença de macrófitas, causando sombreamento, pode modificar a distribuição de calor no lago alterando a estratificação de densidade e da difusão turbulenta e, conseqüentemente, o transporte de substâncias no meio líquido (Tundisi e Eiger, 1998).

Com relação aos fatores físicos, químicos e biológicos, as substâncias que entram no sistema aquático obedecem ao princípio da lei de conservação de massa:

$$\text{Taxa de entrada} = \text{Taxa de saída} + \text{Taxa de decaimento} + \text{Taxa de acumulação} \quad (2.1)$$

O decaimento apresentado na eq. (2.1) indica uma modificação da substância original. Os sistemas podem ser *conservativos* ou *não-conservativos*. Em *sistemas conservativos* a quantidade de matéria que entra no sistema é a mesma que sai, isto é, a concentração das substâncias é constante, a taxa de acumulação é considerada nula e não há decaimento (radioativo, decomposição biológica ou reações químicas) citando-se, por exemplo, os sólidos dissolvidos totais. Em sistemas *não-conservativos* algumas substâncias sofrem reações químicas, biológicas ou nucleares tendendo a “desaparecer” no tempo, ou ainda, a matéria de referência não se conserva. No decaimento de substâncias não conservativas assume-se que o fluxo de "perda" da substância é proporcional à quantidade da substância que está presente; em geral o decaimento é modelado como uma reação de primeira ordem (Soares, 2003).

2.3.1.4 Escoamento em Represas

Segundo Tundisi e Eiger (1998), com relação ao escoamento em represas, as principais características são:

- apresentam velocidades pequenas quando comparadas a rios e estuários;
- efeitos decorrentes da estratificação da densidade são usualmente de primeira ordem;
- devido às baixas velocidades, o fluxo de momentum horizontal através da superfície livre induzido pelo vento também pode ser de primeira ordem;
- possuem estruturas de descarga, cujas localizações e forma podem afetar o escoamento.

Os movimentos encontrados em represas resumem-se em: ondas gravitacionais geradas pelo vento; ondas gravitacionais superficiais ou estacionárias internas – seiches; ondas internas de pequeno comprimento geradas pela estratificação de densidade que se propagam pelo interior do meio líquido; ondas internas afetadas pela batimetria da represa; arraste superficial (circulação horizontal) causado pelo vento; correntes de ressurgência e de submersão; espirais de Langmuir⁸; formação e erosão da termoclina (Tundisi e Eiger, 1998; Porto, 1991).

A complexidade dos modelos é definida pela dimensão de seu escoamento. Os modelos matemáticos de qualidade podem ser: de dimensão 0 (zero) ou mistura completa; dimensão 1 (um) ou unidimensionais ou 1-D; dimensão 2 (dois) ou bidimensionais ou 2-D, e os de dimensão 3 (três) ou tridimensionais ou 3-D, e segundo Tundisi e Eiger (1998) e Tucci (1989) são assim definidos:

1. Modelos de dimensão 0 (zero) ou concentrados ou mistura completa - são modelos matemáticos cujos gradientes espaciais das variáveis de qualidade são desconsiderados. Eles

⁸ Sob a ação de ventos maiores que 3m/s, a formação de ondas superficiais numa represa gera turbulência que produz instabilidade e que se propaga para baixo, formando uma série de correntes helicoidais paralelas (correntes de Langmuir) que giram alternadamente em sentido horário e anti-horário (Porto, 1991).

desconsideram efeitos hidrodinâmicos que afetam escoamentos e tratam o corpo d'água como uma mistura homogênea, com a hipótese de não ocorrência, portanto, de estratificação vertical, ou seja, o corpo d'água é considerado totalmente misturado;

2. Modelos de dimensão 1 (um) - são modelos nos quais os gradientes de qualidade de água são considerados em uma única direção espacial, geralmente na direção vertical ou longitudinal. Nestes modelos as variáveis hidrodinâmicas são tratadas de forma simplificada. São abordados, por exemplo, os mecanismos de troca superficial de calor, transporte de calor por radiação de ondas longas e curtas, influência de vento, retirada seletiva de água e correntes de densidade. Os modelos de direção vertical são melhores aplicados em represas profundas ou nas quais as velocidades de escoamento longitudinal são bem pequenas, o que possibilita a análise dos efeitos de estratificação térmica. Os modelos longitudinais desprezam efeitos de estratificação e são mais indicados para análise de variações ao longo do eixo da represa;

3. Modelos de dimensão 2 (dois) - modelos nos quais os gradientes de qualidade de água podem ser representados pelas direções do plano horizontal ou, pela direção vertical e longitudinal orientada ao longo do escoamento principal de uma represa.

Para represas cuja dimensão longitudinal é muito maior que a transversal e a vertical, o uso do modelo bidimensional, definido pelo plano das direções vertical e longitudinal, pode ser satisfatório, considerando-se balanço de massa e de momentum e utilizando-se as variáveis integradas ao longo da direção vertical.

Para a simulação de correntes utilizam-se geralmente os modelos no plano horizontal (modelos de circulação) que se mostram satisfatórios em corpos d'água cuja velocidade de escoamento impeça a ocorrência de estratificação vertical.

4. Modelos de dimensão 3 (três): simulam simultaneamente os fluxos vertical e ambas as direções horizontais (transversal e longitudinal). Os modelos tridimensionais necessitam de maior coleção de dados medidos em campo para melhor precisão dos resultados gerados.

Além destes, existem os modelos do tipo elo-nó (link-node) onde uma represa é dividida em diversos canais unidimensionais interligados por nós. O escoamento geralmente é simulado no plano horizontal da rede de elos. Os nós representam parte de um corpo d'água medido por sua área de influência e volume respectivos. Os nós podem ser segmentados em camadas cujos gradientes de qualidade de água podem ser simulados na direção vertical (Tundisi e Eiger, 1998).

Hamilton et al. (1997), em um estudo para averiguar qual dimensão da modelagem de qualidade da água é mais adequada na aplicação de um lago ou represa, destacam que um aspecto crítico no critério de modelagem é selecionar um modelo⁹ cuja representação espacial seja apropriada para a relação entre os processos dominantes de mistura e a variação dos dados observados de variáveis de qualidade. Apontam que modelos 1-D são frequentemente usados em lagos e represas de tamanho pequeno a médio para cercar as variações que são mais pronunciadas na direção vertical e; que fatores críticos para a modelagem 1-D são o tamanho do lago, volume dos influxos e velocidade de sedimentação das partículas dos influxos, concluindo que modelos 1-D sejam melhor aplicados, a priori, em lagos com tempo

⁹ Aplicados o modelo DYRESM que é 1-D e o DYRESM-WQ que é 2-D ao Lago Julius, Queensland.

de detenção com cerca de 5 dias e que modelos 2-D sejam aplicados, a priori, em lagos com tempo de detenção com cerca de 2 meses ou mais.

2.3.1.5 A Influência das Tomadas D'Água

A qualidade da água de saída depende da altura da tomada d'água e da época do ano em função da estratificação térmica. Tomadas d'água profundas retiram do hipolímnio a água mais fria, anóxica, rica em gás sulfídrico, de baixo pH e com altas concentrações de matéria orgânica, fosfatos, ferro e manganês. As tomadas superficiais retiram a água mais quente, de maior concentração de oxigênio dissolvido e baixas concentrações de nutrientes. Represas com saídas superficiais exportam calor e acumulam nutrientes. A tomada d'água seletiva permite a retirada em diferentes níveis permitindo a mistura de água de qualidades diferentes (Porto, 1991).

A melhoria ou a manutenção da qualidade da água é fundamental para o seu tratamento e distribuição. Apesar da qualidade da água ser também um fator dependente de uso e ocupação do solo da bacia de drenagem correspondente, a melhoria da sua operação quanto às vazões retiradas em profundidades distintas na coluna d'água através de **tomadas seletivas de água**, incidem diretamente na manutenção das constantes de qualidade da água e, portanto, no ecossistema local (coluna d'água da represa) e a jusante de um barramento (curso d'água).

Para Straskraba e Tundisi (2000), o emprego de tomadas seletivas de água tem as seguintes funções principais para a operação de represas:

- a redução no volume de algas;

- drenagem de águas anóxicas no fundo da represa com altos teores de nutrientes, com a conseqüente redução da estratificação;
- criação de correntes de densidade, capazes de transportar vazões afluentes poluídas o mais rapidamente possível na direção das saídas e com a menor mistura possível com as outras camadas de água, evitando-se picos de fósforo ou agentes poluidores, principalmente durante as cheias.

Straskraba e Tundisi (2000) afirmam que poderão ocorrer mudanças na qualidade da água em função da dinâmica de uma camada específica e devido às mudanças nas vazões afluentes, nas vazões liberadas e nas cotas de retiradas.

Como um dos limites de aplicação das tomadas seletivas é o conhecimento técnico em relação ao comportamento do corpo d'água ao longo de seu período de operação, é fundamental que a simulação de retiradas em diferentes cotas e vazões seja feita com o auxílio de modelo matemático de qualidade da água, tanto para conhecimento das possíveis reações na coluna d'água da represa como para as reações nos constituintes de qualidade dos corpos d'água situados a jusante do lançamento.

2.3.2 Como Escolher o Modelo

Em um estudo específico para escolha do modelo de qualidade mais adequado, Snowling e Kramer (2001) apresentaram um índice de utilidade do modelo para uso na sua seleção, considerando informações sobre as relações entre a sensibilidade (gradiente de variação do resultado em função do número de parâmetros e do gradiente de variação dos mesmos), erros (diferenças entre valores reais e calculados) e complexidade do mesmo. Os autores apontam

que deve ser considerado que modelos mais simples apresentam erros maiores e modelos mais complexos, apesar de terem menores erros, necessitam de mais dados, elevando o custo de aquisição dos mesmos e, em certo ponto, impossibilitando a sua utilização. A complexidade do modelo pode então ser avaliada pelo número de variáveis de estado, número de processos envolvendo as variáveis de estado, o número de parâmetros usados para descrever o processo e o número de operações matemáticas usadas para descrever o processo.

Ao invés de se proceder a uma simples escolha (não tão criteriosa) do modelo a ser usado, Chau et al. (2002) apresentaram um software visando simular a esperteza humana na escolha de modelos de qualidade de água, com base na integração do conhecimento descritivo (dados e informações), conhecimento do procedimento (algoritmos) e conhecimento racional (regras), sendo em outras palavras um *expert system*. O objetivo principal dos autores foi: *formular a escolha do modelo mais adequado para determinado problema ou situação*, considerando o conhecimento de um usuário com relação a determinado projeto, porém com o desconhecimento da modelagem matemática. O usuário do software tem a opção de três escolhas básicas: propósito, projeto e tarefas, subdivididas da seguinte forma: 1º nível - propósito: tempo real ou planejamento; 2º nível - projeto: previsão de fluxo de rio, plano de fluxo, dinâmica de correntes, hidrodinâmica estuarina, distribuição de temperatura/densidade, intrusão de água salina, propagação de ondas, propagação de vento e chuva, poluição de água e eutrofização; 3º nível - tarefas: corrente de água, nível d'água, advecção vertical, dispersão horizontal, oxigênio dissolvido, DQO, fitoplâncton, concentração de nutrientes, interação de sedimento, zooplâncton, outras variáveis físicas e outras variáveis de qualidade. O software deverá indicar a dimensão do modelo (0D, 1D, 2D, 3D), método numérico de solução (elementos finitos, diferença finita), modelo de turbulência (coeficiente de dispersão, comprimento de mistura, $k-\epsilon$), esquema de erro (1ª, 2ª ou ordem maior), condições iniciais e

limites, equação (momento, continuidade, estado, densidade, pressão) e termos da equação (advecção, força de Coriolis, difusão horizontal, decaimento, interação com sedimento).

Rauch et al. (1998) apontam que os principais elementos e critérios para seleção do modelo de qualidade para cursos d'água deverão incluir: escalas temporais e espaciais; funções de energia; dinâmicas de fluxos; dispersão física e numérica; representação do sistema físico; equações hidráulicas e de transporte a serem empregadas; composição de efluentes; complexidade do sub-modelo de conversão; forma da coleção de dados; seleção dos melhores parâmetros e constantes associadas a fórmulas empíricas; métodos de calibração, validação, seleção do modelo e conhecimento de incertezas.

Após a escolha do modelo é fundamental a verificação de sua funcionalidade bem como, a calibração e a validação dos resultados obtidos. A verificação é feita normalmente com o uso de alguns cenários simples (Dahl and Wilson, 2000), permitindo saber se inicialmente o modelo escolhido é adequado. O objetivo da calibração é estimar os parâmetros do modelo. No processo de calibração variam os parâmetros do modelo, dentro dos limites aceitáveis e pré-estabelecidos, com o objetivo de se ajustar os valores calculados pelo modelo a uma série de dados observados em campo. A validação é a verificação do modelo calibrado utilizando uma série de dados de campo diferente daquela utilizada na calibração. O modelo mostrar-se-á adequado quando os valores observados forem similares aos simulados no decorrer da série.

2.3.3 Exemplos de Modelos de Qualidade

Comercialmente e no meio acadêmico levantou-se a existência dos seguintes modelos matemáticos de qualidade de água aplicados em represas:

CE-QUAL-R1

Desenvolvido pelo U.S. Army Corps of Engineers e originário do modelo Water Quality for River-Reservoir Systems – WQRRS (Chen and Orlob, 1972) o CE-QUAL-R1 (Eiker E., Bushman J., Gottesman J.L., 1982) é um modelo matemático em ambiente MS-DOS que descreve a distribuição vertical de energia térmica de materiais químicos e biológicos em uma represa ao longo do tempo.

É usado para: estudar problemas de entradas e saídas de água, efeitos das operações de gerenciamento de represas, eutrofização e possíveis condições anaeróbicas. É capaz de simular a dinâmica de 27 parâmetros de qualidade ao longo da coluna vertical do lago, incluindo 11 parâmetros relativos ao sedimento. O modelo requer um extensivo banco de dados incluindo condições iniciais, coeficientes físicos e geométricos, taxas de reação química e biológica e seqüências temporais de dados hidrometeorológicos.

No CE-QUAL-R1 os gradientes de temperatura e concentrações são simulados somente na direção vertical. A represa é representada com uma seqüência vertical de camadas horizontais as quais a espessura depende do balanço de massa de água. Esse modelo está descrito de forma mais detalhada no Capítulo 4.

CE-QUAL-W2

Originário do modelo Laterally Averaged Reservoir Model – LARM, o CE-QUAL-W2, é um modelo hidrodinâmico de qualidade de água bidimensional ao longo de planos verticais; considera valores médios dos constituintes simulados ao longo de uma direção horizontal.

Pode ser aplicado a corpos d'água estreitos e longos o que inclui rios, lagos, represas e estuários (Tundisi e Eiger, 1998).

O CE-QUAL-W2 prevê elevações da superfície d'água, velocidades e temperaturas, estas, incluídas no cálculo hidrodinâmico devido ao efeito da densidade de água. Algumas combinações de constituintes podem ser incluídas ou excluídas das simulações.

Segundo Cole e Wells (2000) a versão 3.0 do CE-QUAL-W2 inclui: uma solução implícita para os efeitos da viscosidade vertical turbulenta e equações de momento horizontal; adição do algoritmo de Leonard que elimina sub ou super estimativas no esquema de solução numérica; inclusão do momento de transferência entre seções/ramificações; modelagem de múltiplos corpos d'água ao mesmo tempo incluindo represas múltiplas, seções de leitos de rios entre represas e estuários; algoritmos de turbulência vertical e algoritmos de reaeração próprios de rios; grid de espaçamento vertical variável entre corpos d'água; algoritmos numéricos para fluxos em tubulações, comportas e bombas; três grupos de algas; algoritmo para comportas submersas; constituintes arbitrários definidos por uma taxa de decaimento, taxa de determinação e fator multiplicativo de temperatura; nove grupos de sólidos inorgânicos em suspensão; DQO, nitrogênio orgânico, fósforo orgânico; múltiplas entradas e saídas; cálculo com tomadas seletivas; variação temporal das condições de contorno.

Segundo Cole e Wells (2000), as limitações da versão 3.0 incluem:

- hidrodinâmica e transporte - as equações avaliam longitudinalmente e por camadas. Não considera variações transversais de velocidade, temperaturas e constituintes. Isto pode ser impróprio para grandes corpos d'água que apresentem variações transversais significantes na

qualidade de água. Uma vez que momento vertical não é incluído, o modelo pode apresentar resultados imprecisos quando existe aceleração vertical significativa. Consideram-se efeitos de estratificação da densidade referente aos gradientes de temperatura, salinidade e materiais em suspensão;

- qualidade de água – as interações de qualidade de água são necessariamente descrições simplificadas de um ecossistema aquático complexo. Não são considerados zooplâncton, macrófitas e demanda de oxigênio dos sedimentos.

WASP5

O Water Quality Analysis Simulation Program (WASP) versão 5 é um modelo de qualidade de água do tipo link-node (Tundisi e Eiger, 1998) sendo formado pelos seguintes módulos:

Módulo Hidrodinâmico DYNHYD5:

- Desenvolvido em 1993 por Ambrose Jr., R.B., Wool. T.A., Martin, J.L.M. da U.S. Environmental Protection Agency, esse módulo resolve as equações do escoamento na forma unidimensional, considerando: o sistema como uma série de canais retangulares conectados por nós; desprezando a aceleração decorrente da rotação da Terra; a influência da gravidade, do vento e do atrito entre fluido em movimento e os contornos sólidos do meio físico; vazões podem ser constantes ou variáveis no tempo; sistema link-node: o corpo d'água é discretizado em regiões adjacentes, as quais são representadas por nós (nodes) e conectadas por seguimentos ou arcos (links). A cada instante são calculados as velocidades nos seguimentos e os níveis d'água nos nós.

Módulos de Qualidade da Água (EUTRO5 e TOXI5):

Utilizam o princípio da conservação de massa para todos os constituintes considerados. São considerados: o transporte tridimensional de massa por advecção e difusão e os efeitos decorrentes de cargas pontuais e difusas, cargas nos contornos e termos de reação (Tundisi e Eiger, 1998).

São consideradas seis formas diferentes para o transporte de constituintes por advecção e dispersão descritos nos seguintes campos:

- 1°. Fluxos advectivos e dispersivos sobre a coluna d'água;
- 2°. Movimento da água nos interstícios do sedimento, ocorrendo difusão de constituintes entre meio poroso e coluna d'água;
- 3°. 4°. e 5°. Transporte de material particulado devido à decantação, ressuspensão e sedimentação do material;
- 6°. Influência da precipitação e evaporação de ou para o meio líquido.

Módulo de Eutrofização EUTRO5:

- Neste módulo de eutrofização são simulados componentes dos ciclos de nitrogênio (orgânico, nitrato, amônia) e fósforo (orgânico, disponível), matéria orgânica biodegradável, fitoplâncton na forma de carbono, DBO carbonácea e oxigênio dissolvido.

Módulo de Substâncias Tóxicas TOXI5:

- Para simulação do transporte de substâncias orgânicas e metais considerando suas reações e seus mecanismos de transporte na água, no sedimento e em camada inferior ao sedimento, incluindo deposição seca e úmida, volatilização, equilíbrio ácido-base, hidrólise, fotólise, precipitação-dissolução, sorção, oxidação-redução, sedimentação, biodegradação e bioacumulação.

O WASP5 é um modelo de domínio público o que possibilita a alteração de seu código e introdução de outros módulos (Tundisi e Eiger, 1998). Atualmente está disponível a versão 6.0 desse modelo (Wool, 2001).

DELFT3D

Desenvolvido pela DELFT HYDRAULICS LABORATORY, o DELFT3D é um conjunto de programas capaz de simular escoamentos bi e tridimensionais em corpos d'água superficiais e o transporte de constituintes considerando os efeitos de estratificação de térmica existentes em lagos, represas, estuários e baías. As características são: pode ser utilizado na forma 3D ou 2D alterando-se o número de camadas horizontais a serem simuladas; interface amigável que permite toda a editoração, simulação e visualização de projetos e cenários através da seleção de pontos de monitoramento, descargas, seções de contorno, clicando-os sobre um mapa; tal como os modelos mais simples; recursos gráficos animados. É formado pelos seguintes módulos (Tundisi e Eiger, 1998):

Módulo Hidrodinâmico (DELFT3D-FLOW):

- É um modelo matemático de simulação hidrodinâmica, considerando duas dimensões horizontais ou três dimensões, utiliza o modelo k- ϵ de turbulência entre outros de diferentes graus de complexidade (turbulência uniforme, modelos algébricos, modelo k-L). Outras características deste módulo: as variáveis simuladas são níveis d'água, vazões, velocidades e movimentos de partículas; as formulações para a tensão no fundo são: Manning, Colebrook-White, Chezy, Lei da parede (casos 3D); considera o efeito de rotação da Terra no transporte de constituintes (força de Coriolis); tensão de cisalhamento

induzida pelo vento; processos de advecção e difusão são resolvidos iterativamente pelo método implícito de direções alternadas.

Módulos de Qualidade da Água:

- Modelo de Transporte de Constituinte (DELFTED-WAQ) com as seguintes características: modelo de simulação do transporte por difusão advectiva de constituintes; utiliza os resultados do módulo DELFT3D-FLOW; capacidade de simulação de 140 constituintes, dentre os quais os principais são: salinidade; coliformes fecais e totais; DBO; OD; afastamento de temperatura de equilíbrio; C, N, P, Si orgânicos na água e em duas camadas de sedimentos; 4 frações de fósforo inorgânico; amônia, nitrato e silício na água; 3 frações de sedimentos suspensos na água e em duas camadas sedimentares; 3 espécies de algas (diatomáceas, verdes e verde-azuladas) na água e sedimentos; metais pesados e micro-poluente orgânicos na água e no sedimento.
- Modelo de Transporte (DELFT3D-PART) que tem como características: serve para rastreamento de partículas marcadas descrevendo a evolução espacial e temporal de regiões poluídas causadas por descargas instantâneas ou contínuas de constituintes, cujo transporte é função da advecção, efeito do vento e turbulência; constituintes considerados: óleo, sal, temperatura, um constituinte conservativo, um constituinte caracterizado por uma cinética de primeira ordem; número de camadas: uma se não ocorrer estratificação ou duas se houver estratificação; outros constituintes modelados: bactérias, rodamina, DBO; aplicações: faixa de campo médio de 15 a 20 km para descargas contínuas; simulação de pluma para descargas instantâneas (ex: acidentes)

- Modelo de Algas (DELFT3D-ECO)¹⁰: simula os processos biológicos e bioquímicos inerentes ao desenvolvimento de algas e dinâmica de nutrientes, relevantes para o estudo de eutrofização da represa. Composto ainda pelo Módulo BLOOM, é capaz de simular a biomassa algal e composição de certas espécies de fitoplâncton.

MIKE 3

Desenvolvido pela DANISH HYDRAULIC INSTITUTE, o software reúne vários módulos para simulações em 3D de escoamentos de superfície livre, qualidade da água e transporte de sedimentos em rios, lagos, represas, estuários e mar aberto (Tundisi e Eiger, 1998).

Módulo Hidrodinâmico – MIKE 3 HD:

- Simula a hidrodinâmica com base nas equações de conservação de massa e de momentum (flutuações turbulentas – tensões de Reynolds). O módulo considera entradas e saídas de água, batimetria variável, tensões induzidas pelo vento, trocas de calor com a atmosfera, evaporação, precipitação, variação de densidade, força de Coriolis, calculando pressões e velocidades.

Módulo de Advecção - Dispersão MIKE 3 AD:

- Simula o transporte de constituintes (substâncias conservativas, coliformes, sedimentos) dissolvidos ou em suspensão.

Módulo de Qualidade da Água – MIKE 3 WQ

- Considera os seguintes processos: reaeração através da superfície livre; produção e consumo de oxigênio pela fotossíntese; consumo de oxigênio no sedimento e em

¹⁰ fonte: <<http://www.wldelft.nl/d3d>>

suspensão proveniente da decomposição de matéria orgânica; nitrificação; transporte vertical e horizontal de oxigênio; simula concentração de nutrientes: oxigênio dissolvido, DQO, amônia, nitrato, fósforo, bactérias (coliformes totais e fecais), clorofila-a.

Módulo de Eutrofização – MIKE 3 EU:

- Simula o ciclo anual completo de algas e dinâmica de nutrientes, abrangendo a produção primária de fitoplâncton e seu consumo pelo zooplâncton e, considerando o carbono, o nitrogênio e o fósforo fitoplanctônicos, concentração de clorofila, carbono zooplanctônico, carbono, fósforo e nitrogênio dos detritos, nitrogênio e fósforo inorgânicos, oxigênio dissolvido e o carbono da vegetação bentônica.

Módulo de Metais Pesados – MIKE 3 ME:

- Considera metais dissolvidos e adsorvidos na água, sedimentos em suspensão, metais dissolvidos nos interstícios do leito, metais adsorvidos nos sedimentos do leito e espessura da camada sedimentar.

Módulo de Rastreamento de Partículas – MIKE 3 PA:

- Este módulo simula o transporte de substâncias dissolvidas ou suspensas no meio aquático através do rastreamento de partículas, considerando os processos dispersivos e advectivos dos constituintes.

GLLVHT - GEMSS

Desenvolvido pela J. E. Edinger Associates, Inc., o GLLVHT (Generalized, Longitudinal-Lateral-Vertical, Hydrodynamic and Transport) simula em 3D velocidades, níveis d'água e

concentrações de constituintes variáveis em rios, lagos, represas, estuários e corpos d'água costeiros (Tundisi e Eiger, 1998). Atualmente, está disponível a versão que integra o GLLVHT com o sistema de informação geográfica (SIG) denominado GEMSS (Generalized Environmental Modeling System for Surfacewaters). Os módulos do modelo são:

Módulo Hidrodinâmico – HDM:

- Módulo destinado à resolução das equações tridimensionais da continuidade, do momentum, transporte de constituintes. A ação do vento e dos contornos sólidos é considerada através de relações quadráticas e da determinação de coeficientes de atrito.

Módulo de Qualidade da Água – WQM, composto por três modelos para diferentes objetivos de simulação:

- EUTRO5 (WASP5), destinado à simulação do impacto causado no oxigênio dissolvido por efluentes domésticos. Além das variáveis retro citadas, também são consideradas nitrogênio orgânico, fósforo orgânico e DBO carbonácea;
- WQ3D, pode efetuar a modelagem dos ciclos de nutrientes e da dinâmica populacional de fitoplâncton. Também são considerados nitrogênio orgânico particulado e dissolvido, fósforo orgânico particulado e dissolvido e, DBO carbonácea particulada e dissolvida;
- WQ3DCB, também pode efetuar a modelagem dos ciclos de nutrientes e da dinâmica populacional de fitoplâncton além das trocas dos constituintes entre a água e os sedimentos. Além das variáveis retro citadas, também são considerados nitrogênio orgânico particulado e dissolvido, fósforo orgânico particulado e dissolvido, DBO carbonácea dissolvida de reação lenta, carbono orgânico particulado – de reação lenta, de reação rápida e refratária.

Módulo de Transporte de Sedimentos – STM:

- É destinado à resolução de equações de transporte de sedimentos considerando sedimentação, floculação, deposição, erosão, ressuspensão, carga do sedimento de fundo, encouraçamento e deformação do leito.

Módulo de Rastreamento de Partículas – PTM:

- O módulo acompanha a trajetória 3D das partículas marcadas lançadas no meio aquático à medida que são transportadas pelo campo tridimensional de velocidades gerado pelo módulo hidrodinâmico.

Módulo de Derrame de Petróleo e de Outras Substâncias – OCSM:

- Simula: advecção, espalhamento, evaporação, dispersão, dissolução, emulsificação, foto-oxidação, reações químicas, biodegradação, sedimentação e encapsulamento na presença de gelo de derramamento acidental de óleo.

O GLLVHT-GEMMS é utilizado nos E.U.A., Alaska e Índia¹¹.

DYRESM-CAEDYM-ELCOM

Os modelos denominados DYnamic REservoir Simulation Model (DYRESM) e Computational Aquatic Ecosystem DYnamic Model (CAEDYM) foram inicialmente desenvolvidos pelo Centre of Water Research, University of Western Austrália a partir de 1980 com o propósito da simulação da hidrodinâmica e qualidade da água em lagos e represas (Arheimer e Olsson, 2002). Posteriormente, foi desenvolvido o ELCOM (Estuary and Lake Computer Model).

¹¹ fonte: <[http:// www.jeeai.com](http://www.jeeai.com)>

O DYRESM é um modelo hidrodinâmico de uma dimensão para previsão da distribuição vertical de temperatura, salinidade e densidade de represas e lagos. Considera que variáveis de força (vento, congelamento da superfície e influxos na coluna d'água) não interferem sobre prolongados períodos de tempo. Seu período de simulação varia de semanas a décadas. Tem a sensibilidade para prever variações sazonais e inter-anuais incorporando fatores ambientais de longo termo ou as propriedades da bacia. Tal como o CE-QUAL-R1, a represa é representada como uma série de camadas horizontais, não havendo variações laterais nem longitudinais das camadas e onde o perfil vertical é obtido dos valores de cada camada (Antenucci e Imerito, 2003).

O DYRESM considera: trocas superficiais de calor; camada superficial misturada considerando os processos de revirada convectiva (estratificação instável por resfriamento da camada superficial), agitação (pela ação do vento), cisalhamento (turbulência e maior poder de mistura), instabilidade nas interfaces devido ao cisalhamento; entrada de água (podendo ocorrer em diferentes camadas por diferença de densidades); saída de água (influência da altura da tomada d'água); mistura abaixo da camada superficial (mistura do hipolímnio por difusão turbulenta); desestratificação através de plumas de bolhas de ar - mistura forçada.

O ELCOM é um modelo hidrodinâmico de três dimensões onde é simulada a hidrodinâmica através das equações diferenciais e de momentum de Navier-Stokes considerando-se o princípio da conservação de massa. É usado para prever a variação da temperatura e salinidade da água. A difusão molecular na direção vertical é negligenciada uma vez que o transporte turbulento e a difusão numérica são genericamente dominantes. A evolução da superfície livre é governada pela integração vertical da equação da continuidade para fluxos incompressíveis na coluna d'água aplicada às condições limite da cinemática. As trocas de

calor através da interface ar-água são definidas pelos pacotes de modelos encontrados na literatura. A transferência de energia através da superfície livre é separada em componentes não penetrativos de radiação de ondas longas, transferência sensível de calor e perda de calor por evaporação complementada por radiação penetrativa de ondas curtas. Os efeitos não penetrativos são introduzidos como fonte de temperatura na camada bem misturada de superfície enquanto que os efeitos de penetração são introduzidos como termos de fonte em uma ou mais camadas do grid, com base em um coeficiente de extinção e decaimento exponencial - Lei de Beer (Hodges e Dallimore, 2001).

O CAEDYM, que é um modelo ecológico aquático e que também pode rodar isoladamente ou em conjunto com o DYRESM ou ELCOM, consiste de uma série de equações matemáticas representando os maiores processos biogeoquímicos que influenciam na qualidade da água sendo basicamente uma biblioteca de subrotinas que contém descrição de processos para produção primária, produção secundária, ciclo de metais e nutrientes, dinâmica de oxigênio incluindo sedimento. O pacote tem sido usado em diversos países da Europa como França, Dinamarca, Itália, Holanda, Noruega, Polônia, Espanha, Portugal, Reino Unido dentre outros (Imberger e Peterson, 1980; Han et al., 2000; Hamilton e Schladow, 1997¹²; Schladow e Hamilton, 1997¹³; Hejzlar, 1993¹⁴ apud Arheimer e Olsson, 2002).

Dentre os processos simulados pelo CAEDYM, podem ser citados:

¹² HAMILTON, D. P.; SCHLADOW, S. G. Prediction of water quality in lakes and reservoirs. Part I: Model description. *Ecological Modelling*. Vol. 96, p. 91-110, 1997.

¹³ SCHLADOW, S. G; HAMILTON, D. P. Prediction of water quality in lakes and reservoirs. Part II: Model calibration, sensitivity analysis and application. *Ecological Modelling*. Vol. 96, p. 111-123, 1997.

¹⁴ HEJZLAR, J. et al. Importance of epilimnion phosphorus loading and wind-induced flow for phytoplankton growth in Rimov Reservoir. *Water Science and Technology*. Vol. 28, p. 5-14, 1993.

- dinâmica de população fitoplanctônica considerando temperatura, radiação solar, nutrientes e silício, para algas diatomáceas, perdas decorrentes da ação, morte e sedimentação do zooplâncton no fundo.
- considera as relações entre as concentrações de nutrientes (fósforo solúvel reativo, fósforo, total, nitrato, amônia e nitrogênio total) e silício existentes na água com as suas correspondentes concentrações no fitoplâncton.
- são consideradas as formas reduzidas e totais de ferro em manganês na água.
- considera os processo de: fotossíntese, respiração, DBO e OD na coluna d'água e sedimentos, nitrificação, desnitrificação e oxidação de formas reduzidas de ferro e manganês, além da reaeração na interface ar-água.
- considera os efeitos de sedimentação, agregação e difusão de partículas na água, cisalhamento do meio aquático, sedimentação diferencial e mecanismo de coagulação.

Maiores detalhes do CAEDYM podem ser obtidos de Romero (2003) e Hipsey (2003).

Em um estudo para avaliação do melhor modelo hidrodinâmico para aplicação na represa Billings em São Paulo, Tundisi e Eiger (1998) apontam que entre os modelos DELFT3D, GLLHVT, MIKE3, WASP5, CE-QUAL-W2 e DYRESM-WQ1.5 (Versão anterior - 1997 - do DYRESM-CAEDYM) os melhores modelos com relação à:

- formulação hidrodinâmica são o DELFT3D, MIKE 3 e GLLVHT;
- formulação de turbulência são o DELFT3D e MIKE 3;
- formulação de qualidade de água é o DELFT3D.

Podem ser citados ainda os seguintes modelos:

PROTECH

Reynolds et al. (2000) desenvolveram um modelo unidimensional vertical para simular 8 espécies de fitoplânctons em lagos e represas. Com base em uma solução de primeira ordem, o modelo simula a replicação das células de fitoplâncton em resposta às alterações no ambiente aquático (entrada de nutrientes, penetração de luz, vento etc.). As simulações mostram qual a magnitude, periodicidade e espécies dominantes de fitoplâncton devido à ocorrência de estratificações térmicas, desestratificação e trocas na coluna d'água, incluindo ressuspensão e redeposição do fluxo nos sedimentos. O modelo incorpora ainda a motilidade do fitoplâncton ao longo da coluna d'água.

HEC-5Q

Desenvolvido pelo U.S. Army Corp os Engineers (USACE), o HEC-5Q é um sub-modelo do modelo HEC-5. É um modelo de uma dimensão capaz de simular a distribuição vertical de temperatura e outros constituintes como OD e DBO em represas e cursos d'água.

O modelo também determina a abertura de comportas em tomadas d'água seletiva fim de se encontrar um determinado nível de qualidade de água desejado pelo usuário. Caso o objetivo não possa ser alcançado, o modelo pode determinar se um aumento da quantidade de fluxo permite alcançar o objetivo (Deas e Lowney, 2000).

DEWALQ-BLOOM-SWITCH ou DBS

O modelo DBS foi desenvolvido pelo Inst. For Inland Water Management and Waste Water Treatment (RIZA) na Holanda em 1994 e tem como propósito o gerenciamento de eutrofização. O objetivo do modelo é aumentar a compreensão do processo de eutrofização. O modelo contém cerca de 45 variáveis de estado e 17 arquivos contendo parâmetros da água, sedimento e camada limite. As entradas variáveis de tempo são as hidráulicas e fluxos de saída, carga de nutrientes especificadas por frações, irradiação, temperatura da água.

A saída de todas as variáveis e fluxos pode ser diária. O modelo pode ser aplicado a um compartimento ou rede de compartimentos. O sub-modelo DEWALQ é a base do modelo Danube Water Quality Model (DWQM) usado para controle de eutrofização no Mar Negro (van der Molen, 1999¹⁵ e van der Molen et al., 1994¹⁶ apud Arheimer e Olsson, 2002).

LIMNOD

Desenvolvido pelo Laboratory of Hydraulics, Hydrology and Glaciology, Eidgenössische Technische Hochschule, Zurique na Suíça (1992), tem como objetivo a previsão de longo termo da qualidade da água em lagos, abrangendo estudo dos efeitos de oxigenação, drenagem de águas profundas e mistura artificial. O LIMNOD é um modelo de lago de uma dimensão na vertical que considera conjuntamente processos físicos, bioquímicos e de sedimentação. Para descrição dos processos físicos, cujas variáveis de estado são temperatura e condutividade, o lago é dividido em duas camadas uniformemente misturadas (epilímnio e hipolímnio) divididas pela termoclina, cuja profundidade é calculada diariamente através do

¹⁵ VAN DER MOLEN, D. T. The role of eutrophication models in management. Ministry of Transport, Public Works and Water Management. Inst. For Inland Water Management and Waste Water Treatment. RIZA Report 99.020, Lelystad. Holanda, 1999.

¹⁶ VAN DER MOLEN, D. T. et al. Mathematical Modeling as a tool of management in eutrophication control of shallow lakes. *Hydrobiology*. 275/276: 479-492. 1994.

balanço de energia, considerando as trocas de calor e radiação com a atmosfera e a energia imposta pelo vento. O ciclo de nutrientes, baseado nos processos físicos, é calculado tendo o fósforo como limitante de nutriente (variáveis de estado são as concentrações do carbono orgânico particulado – biomassa, o oxigênio dissolvido, o fósforo solúvel e o fósforo particulado. No sedimento, fósforo orgânico, fósforo inorgânico e carbono orgânico são considerados. Os processos bioquímicos influenciam a estabilidade da coluna d'água devido à extinção de luz, devido à redução de biomassa, reduzindo a penetração na profundidade da entrada da radiação de ondas curtas e devido a dissolução de partículas sedimentares do epilimnio, aumentando a concentração das espécies dissolvidas no hipolimnio (Jørgensen et al.; 1996¹⁷, Karagounis, 1992¹⁸; Karagounis et al., 1993¹⁹ apud Arheimer e Olsson, 2002).

PC-LAKE

O PC-LAKE tem o propósito de gerenciamento de eutrofização. Esse modelo, desenvolvido em 1992 pelo Laboratory for Water and Drinking Water Reserach (LWD) situado na Holanda, verifica a cadeia alimentar em lagos rasos. A cadeia alimentar é simulada de forma a prever o efeito da redução de cargas de nutrientes, dragagem, manipulação química, gerenciamento biológico ativo e intervenções na cadeia alimentar. O modelo combina os ciclos de nutrientes internos assemelhando-se com uma cadeia alimentar. Dentre suas aplicações estão a calibração combinada em uma lista de dados de múltiplos lagos, efeitos de crescimento versus decrescimento das cargas, avaliação de diferentes cenários de

¹⁷ JØRGENSEN, S. E.; HALLING-SOERENSEN, B.; NIELSEN, S. N. Handbook of Environmental and Ecological Modelling. Boca Raton, 1996. 672 p.

¹⁸ KARAGOUNIS, I. Ein physikalish-biochemisches Seemodell; Anwendung auf das Nordbecken des Luganersees. Laboratory of Hydraulics, Hydrology and Glaciology, Federal Institute of Technology. Communications Nr. 116. Zurich. Suíça, 1992.

¹⁹ KARAGOUNIS, I; TRÖSCH, J.; ZAMBONI, F. A coupled physical-biochemical lake model for forecasting water quality. Aquatic Sciences. Vol. 2, p. 87-102, 1993.

recuperação, já utilizados na Holanda. O modelo também pode ser ligado ao DUFLOW²⁰ - modelo de transporte de água (Janse, 1997²¹; Janse e van Liere, 1995²²; Janse et al., 1998²³; Janse et al., 1992²⁴ apud Arheimer e Olsson, 2002).

PH-ALA

O PH-ALA, desenvolvido em 1996 pelo Department Hydraulic, Transportation and Roads, Faculty of Engineering, University of Rome “La Sapienza”, situado na Itália, tem como objetivo analisar em muitos períodos anuais da tendência do processo de eutrofização em um lago considerando as características tridimensionais do campo hidrodinâmico. O sistema é composto por dois sub-modelos: um hidrodinâmico, cujos parâmetros são as componentes de velocidade, temperatura, pressão barométrica e anomalia de densidade e; um de balanço de massa cujos parâmetros são: concentração de fitoplâncton e de fósforo, taxa de retirada de fósforo do sedimento, concentração de fósforo no sedimento, componentes residuais de velocidade, taxa de crescimento de fitoplâncton, fração de fósforo na biomassa algal e velocidade de sedimentação. As funções de força consideradas são: ação do vento (velocidade e direção em longos períodos), distribuição de temperatura inicial no lago, localização, massa e entrada de poluentes, radiação solar diária. O modelo é utilizado na Itália (Jorgensen et al., 1996²⁵ apud Arheimer e Olsson, 2002).

²⁰ DUFLOW é um modelo matemático, desenvolvido em 1992, de 1-D, para simular propagação de ondas em estuários, fluxo de ondas em rios, operação de sistemas de irrigação e problemas de qualidade de água.

²¹ JANSE, J. H. a model of nutrient dynamics in shallow lakes in relation of multiple stable states. *Hydrobiology* 342/343:1-8. 1997..

²² JANSE, J. H.; OCH VAN LIERE, L. PCLAKE: a modeling tool for evaluation of lake restoration scenarios. *Water Science and Technology*. Vol. 31, p. 371-374, 1995.

²³ JANSE, J. H.; VAN DONK, E.; ALDENBERG. T. A model study of the stability of the macrophyte-dominated states as affected by biological factors. *Water Research*. Vol. 32, p. 2696-2706, 1998.

²⁴ JANSE, J. H.; ALDENBERG. T.; KRAMER, P. R. G. A mathematical model of the phosphorus cycle in Lake Loosdrecht and simulation of additional measures. *Hydrobiology* 233: 119-136. 1992

AGNPS

Desenvolvido pelo United States Department of Agriculture (USDA) em 1987, o AGNPS é um modelo de base física desenvolvido para avaliação de erosão do solo ao longo de um curso d'água e qualidade de água em bacias hidrográficas urbanas. É um modelo baseado em um grid para simulações isoladas de eventos de chuva no qual a bacia hidrográfica é dividida em diversos retângulos cujos tamanhos podem ser diferenciados. O modelo pode então simular hidrologia (escoamento superficial e vazões de pico), erosão do solo, transporte de sedimentos e nutrientes (nitrogênio, fósforo e DQO) para cada quadrícula do grid, interligando o transporte entre as mesmas. O modelo requer 22 parâmetros de entrada. No pacote está incluído um modelo de elevação digital de terreno, podendo ser inseridas, declividades, tipo de uso do solo e informações de fontes pontuais. Inclui-se no pacote o modelo CREAMS²⁶ para previsão de transporte e interação de partículas do solo contendo nutrientes de pesticidas. É utilizado em diversos países como Portugal, Espanha, Reino Unido, Polônia, Dinamarca, França dentre outros (Bragadin et al., 1993²⁷; Fisher et al., 1997²⁸; Klaghofer et al., 1993²⁹; Rode and Frede, 1997³⁰; Young et al., 1987³¹ apud Arheimer e Olsson, 2002).

²⁵ JØRGENSEN, S. E.; HALLING-SØERENSEN, B.; NIELSEN, S. N. Handbook of Environmental and Ecological Modelling. Boca Raton, 1996. 672 p

²⁶ CREAMS posteriormente deu origem ao GLEAMS (Groundwater Loading Effects of Agricultural Management Systems).

²⁷ BRAGADIN, G. L. et al. Agricultural non-point source nutrients loadings estimated by means of an extended version of AGNPS. The Bidente-Ronco case study – Part I. *Ingegneria Ambientale* 22: 455, 1993.

²⁸ FISHER, P.; ABRAHART, R. J.; HERBINGER, W. The sensitivity of two distributed non-point source pollution models to the spatial arrangement of the landscape. *Hydrobiological Processes*. Vol. 11, p. 241-252, 1997.

²⁹ KLAGHOFER, E.; BIRNBAUM, W.; SUMMER, W. Linking sediment and nutrient export models with a geographic information system. *Applications of Geographic Information Systems in Hydrology and Water Resources Management*. Nº 211, p. 501-506. 1993.

³⁰ RODE, M.; FREDE, H. G. Modification of AGNPS for agricultural land and climate conditions in Central Germany. *Journal of Environmental Quality*. Nº 26, p. 165-172, 1997.

CE-QUAL-ICM

Desenvolvido primeiramente pelo US Army Corps of Engineers (USACE) do Waterways Experiment Station (WES), Environmental Laboratory, num pacote de modelos para a Baía de Chesapeake, sendo o código posteriormente modificado com melhorias, o CE-QUAL-ICM é um modelo de eutrofização de volume finito. As principais características do modelo são: configurações operacionais em 0D (mistura completa), 1D, 2D ou 3D; 22 variáveis de estado o que inclui propriedades físicas; múltiplas formas de algas, carbono, nitrogênio, fósforo e sílica, além de oxigênio dissolvido, matéria orgânica dissolvida, temperatura, salinidade, DQO; o oxigênio no sedimento e os fluxos podem ser simulados em um submodelo provisional de bentos ou ser inserido com base em dados observados; as variáveis de estado podem ser ativadas ou desativadas individualmente; simula e reporta concentrações, transporte de massa, transformações cinéticas, e balanço de massa. Dentre suas limitações destacam-se que: o modelo não simula hidrodinâmica o que demanda que os fluxos, taxas de difusão e volumes sejam calculados externamente através de outro modelo como o CH3D-WES (Cerco e Cole, 1995³² apud SMIC, 2003).

EFDC/HEM-3D

O modelo EFDC (Environmental Fluid Dynamics Code) foi desenvolvido em 1992 pelo Virginia Institute of Marine Science. Já foi empregado na Baía Chesapeake e em estuários. O EFDC resolve equações em 3D, hidrostática vertical, superfície livre e turbulência média para

³¹ YOUNG, R. et al. AGNPS: Agricultural Non-Point Source Pollution Model: a watershed analysis tool. USDA-Agricultural Research Service, Conservation Service Report 35, USDA, Washington, D. C., 1987.

³² CERCO, C. F.; COLE, T.; User's Guide to the CE-QUAL-ICM Three-Dimensional Eutrophication Model, Release Version 1.0, Technical Report EL-95-15, US Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS. 1995.

movimentos de fluídos de densidade variável num sistema de coordenadas cartesianas verticais ou curvilíneas e coordenadas horizontais ortogonais. O modelo inclui a solução de equações de transporte para energia cinética turbulenta, escala de comprimento turbulento, salinidade e temperatura. O modelo resolve simultaneamente um número arbitrário de equações de transformação-transporte euleriano para materiais dissolvidos e em suspensão. Inclui a operação de estruturas hidráulicas como vertedores. Pode incorporar stress de radiação devido às ondas de gravidade da superfície de alta frequência. O modelo incorpora ainda formulação para resistência da vegetação em 2D e 3D para simulação do fluxo em ambientes vegetais. O EFDC pode ser usado para gerenciar um número de modelos de qualidade água externos usando procedimentos de processamento de conexão internos.

Em síntese, o EFDC é um modelo hidrodinâmico e de transporte de sedimentos tridimensional (3D) que em tempo real simula a densidade e circulação induzida topograficamente, como também os fluxos sob ação do vento, distribuição temporal e espacial de salinidade, temperatura e concentração do sedimento, sendo também capaz de trabalhar com áreas rasas, secas e úmidas, estruturas hidráulicas de controle, resistência da vegetação à áreas alagadas (wetlands). Informações de processos de transporte físicos (difusivos e advectivos) simulados pelo modelo hidrodinâmico podem ser usadas para estimativa do transporte de substâncias passivas incluindo parâmetros não-conservativos de qualidade de água.

Para simular 21 variáveis de estado de qualidade de água, o Virginia Institute of Marine Science desenvolveu o HEM-3D (Hydrodynamic-Eutrophication Model), cuja função é receber as informações de transporte físico do EFDC e simular as distribuições temporais e espaciais dos parâmetros de qualidade de água, incluindo oxigênio dissolvido, 3 grupos de

algas, diversos componentes de carbono, nitrogênio, fósforo, ciclos de sílica e coliformes fecais. Foi desenvolvido também um módulo de transporte de sedimentos com 27 variáveis de estado, que recebendo as informações referentes à matéria orgânica particulada presente na coluna d'água, simula sua “*diagenesis*” resultando no fluxo de substâncias inorgânicas tais como amônia, nitrato, fosfato e sílica, e demanda de oxigênio do sedimento sobre a coluna d'água. O funcionamento do modelo de sedimento somado ao modelo de qualidade de água não só aumenta a capacidade de prever parâmetros de qualidade como também permite simular as alterações ocorridas em longo período devido às alterações das cargas de nutrientes (Hamrick, 1996³³ e Park et al., 1995³⁴ apud SMIC, 2003).

CH3D-WES

Desenvolvido pelo US Army Corps of Engineers (USACE) Waterways Experiment Station (WES), Coastal and Hydraulics Laboratory (CHL), o CH3D-WES é um modelo hidrodinâmico numérico cuja representação da dimensão vertical pode ser em um grid-Z ou versão planificada em sigma. O modelo simula a hidrodinâmica sobre um grid curvilíneo ou plano limite, podendo simular os processos físicos influentes na circulação e mistura vertical, incluindo efeitos de corrente, vento e densidade (salinidade e temperatura), influxos de água, turbulência e rotação da Terra. Algumas modificações feitas no modelo incluíram a incorporação de uma forma compacta dos termos de difusão de momentum horizontal e um módulo com duas equações de turbulência vertical k- ϵ (Chapman et al., 1996 apud SMIC, 2003).

³³ HAMRICK, J.M. User's Manual for the Environmental Fluid Dynamics Computer Code, Special Report No. 331 in Applied Marine Science and Ocean Engineering, School of Marine Science, Virginia Institute of Marine Science, The College of William and Mary, Gloucester Point, VA. 1996.

³⁴ PARK, K.; KUO, A.Y.; SHEN, J.; HAMRICK, J. A Three-Dimensional Hydrodynamic-Eutrophication Model (HEM3D): Description of Water Quality and Sediment Process Submodels, Special Report No. 327 in Applied Marine Science and Ocean Engineering, School of Marine Science, Virginia Institute of Marine Science, The College of William and Mary, Gloucester Point, VA. 1995.

BACTERIOPLÂNCTON DYNAMIC MODEL / LAKEWEB

Boulion e Håkanson (2003) apresentaram um modelo dinâmico genérico para prever biomassa e produção de bacterioplâncton em lagos. É um sub-modelo do LAKEWEB que, além do bacterioplâncton, é capaz de simular fitoplâncton, dois tipos de zooplâncton (herbívoros e predatórios), dois tipos de peixes (predatórios e “presa”), zoobentos, macrófitas e algas bentônicas. O modelo usa equações diferenciais ordinárias apresentando variações semanais contando com uma forma genérica para a maioria das interações bióticas / abióticas em todo o lago. O sub-modelo inclui algoritmos para produção de bacterioplâncton, eliminação de bacterioplâncton, consumo de bacterioplâncton por zooplâncton herbívoro, além das taxas que representam esses processos.

2.4 Integração de Modelos

A seguir tem-se a descrição de alguns modelos integrados:

2.4.1 Integração de Modelos de Qualidade e Quantidade

MODSIMQ (MODSIM / QUAL2E)

Dai (1996) apresentou o MODSIMQ, uma ferramenta de suporte a decisão no gerenciamento de recursos hídricos sendo uma integração de dois modelos matemáticos: o MODSIM (Labadie, 1993) e o QUAL2E (Brown e Barnwell, 1987). O MODSIMQ, além de considerar os limites superiores e inferiores de quantidade (solução linear) também, é capaz de

considerar os limites dos constituintes de qualidade, solução de programação não linear inerente às equações de balanço de massa de constituintes de qualidade.

O autor recorreu ao algoritmo de Frank-Wolfe, um método de busca de uma dimensão para solução de problemas não lineares tendo uma função linear de custo diferenciável e convexa, introduzindo-o na rotina de cálculo para utilização do MODSIM. Esta linearização com o uso do algoritmo de Frank-Wolfe foi feita com o uso do algoritmo FIBION (Kuester e Mize, 1973), que é um algoritmo de busca com intervalo de eliminação, reduzindo o tempo de cálculo computacional.

A interface MODSIMQ foi então aplicada em um estudo de caso, Lower Arkansas River Basin no Colorado, EUA, onde o autor validou sua utilização. Constituintes de qualidade simulados foram: oxigênio dissolvido, DBO, temperatura, algas como clorofila-a, nitrogênio orgânico, amônia, nitrito, nitrato, fósforo orgânico, fósforo dissolvido, coliformes.

MODSIM / QUAL2E-UNCAS

Azevedo et al. (2000) apresentaram a integração do MODSIM, já citado, e um modelo de qualidade de água para canais naturais e artificiais, o QUAL2E-UNCAS , uma versão melhorada do QUAL2E, capaz de simular até 15 constituintes de qualidade de água, assumindo mistura total verticalmente e lateralmente.

Neste estudo, os resultados gerados pelo MODSIM foram aplicados ao QUAL2E-UNCAS para simulação da qualidade de água ao longo de uma bacia hidrográfica. Melhorado para a

utilização em sistemas de suporte à decisão, o QUAL2E-UNCAS permite que os níveis pré-estabelecidos de tratamento possam ser aplicados a todos os constituintes de qualidade.

Através de uma formulação diferencial finita de 1-D advecção-dispersão, o modelo permite a inserção de múltiplas descargas de efluentes, vazões de tributários, retiradas, assim como incremento de influxos e defluxos.

Simulações estocásticas foram feitas com base na teoria de Monte Carlo para geração de 250 possíveis valores de parâmetros coletivos para cada alternativa de planejamento de estudo, as quais alimentaram o modelo de planejamento, definido com horizonte de 12 meses de simulação.

Nesse estudo o autor validou o modelo com a simulação de 3 anos, incluindo um ano muito seco, um muito úmido e um ano médio. Foram estudadas cinco alternativas para solução do problema de alocação de água na Bacia do Rio Piracicaba, incluindo melhoria da eficiência da coleta de esgoto urbano, construção de uma nova represa, melhoria da eficiência do tratamento de esgoto industrial.

CALSIM II / APSIDE / DSM2-SJR

Quinn et al. (2002) apresentaram a integração de modelos para avaliar os impactos sociais, ambientais, de produção agrícola e de abastecimento de água para mudança climática na Bacia hidrográfica do rio San Joaquin na Califórnia. Essa integração incluiu um modelo de simulação de rede de fluxo (ou alocação de água) denominado CALSIM-II para atender às metas federais e demanda do estado da Califórnia visando a alocação de água nessa bacia, a

manutenção da qualidade da água e ainda a migração do peixe anadromus. A resposta do modelo inclui retiradas mensais de represas, fluxos de canais, volumes armazenados em represas e parâmetros de atendimento à qualidade da água no rio San Joaquin; a resposta alimenta o modelo APSIDE (Agricultural Production Salinity Irrigation Drainage Economics) que simula qualidade de água subterrânea quanto à salinidade e qualidade de água da área drenada pela agricultura baseado nas práticas empregadas na agricultura, as quais são modificadas de forma a obter a melhor vantagem econômica; a resposta do APSIDE deve então realimentar o CALSIM-II e alimentar o modelo unidimensional DSM2-SJR (versão do California Department of Water Resources Delta Simulation Model calibrado para o rio San Joaquin) usado para simular o fluxo e a salinidade do rio San Joaquin, com base no método do balanço de massa. As entradas do CALSIM-II foram geradas com cenários de dois modelos climáticos de circulação geral, sendo o HadCM2 (Hadley Centre Model) e o PCM (Atmospheric Research Pacific Climate Model) simulando séries históricas de 30 anos, projetando séries futuras.

Na integração do CALSIM-II, do APSIDE e do DSM2-SJR, os autores depararam-se com dificuldades de ligação entre os modelos, pois os mesmos não foram desenvolvidos para integrações, além da resposta dos modelos serem em escalas de tempo diferentes e a existência de mais de cem variáveis de decisão devido a política existente. Houve a necessidade de se fazer um banco de dados comum a todos os modelos adotando-se o HEC-DSS (Hydrologic Engineering Center's Data Storage System) como a base de gerenciamento. Outra ação tomada foi georeferenciar os três modelos em um sistema de informação geográfica (SIG) o que possibilitou ver os dados de forma mapeada. A interface/sistema de modelagem modular foi tratada como um Sistema de Suporte à Decisão baseada em um SIG e

os modelos foram convencionados a trabalharem de forma mensal. Posteriormente foi criado um ambiente em HTML para acesso e simulação via Internet.

SIAM

Campbell et al. (2002) apresentaram o Systems Impact Assessment Model (SIAM) sob licença do U.S. Geological Survey. O SIAM integra o MODSIM que é um modelo de quantidade de água em rede de fluxo desenvolvido por Labadie (1993) com o HEC-5Q que é um modelo de qualidade de água e com o SALMOD que é um modelo que rastreia as causas da mortalidade e estima a população sobrevivente de peixes.

O SIAM foi aplicado na bacia hidrográfica do rio Klamath situado na Califórnia, simulando a qualidade de água nas represas Keno, Copco e Iron Gate. Para as simulações foram usados dados hidrológicos e meteorológicos do ano de 1992. Os dados gerados mensalmente pelo MODSIM foram transformados em valores diários que juntamente com os dados meteorológicos serviram como dados de entrada para o HEC-5Q simulando temperatura, oxigênio dissolvido, DBO do sedimento e reareção nas represas citadas e nos cursos d'água. Os cenários foram montados com base nas regras e políticas operacionais pré-estabelecidas para a bacia simulando suas conseqüências sobre a qualidade da água.

RIVERWARE / RIVERWARE-Water Quality Modeling Capabilities

Dentre as ferramentas do modelo RIVERWARE anteriormente descrito, existe um modelo de qualidade de água de dimensão zero (0D ou mistura completa) utilizado para simulação de sólidos dissolvidos totais (Zagona et al, 2001).

2.4.2 Integração de Modelos de Qualidade

AGNPS / WASP

Objetivando estimar e simular a carga de fósforo em uma represa na China, (Kao et al., 1998) integraram os modelos AGNPS e o WASP.

Os dados de escoamento superficial são determinados pelo Método da Curva do Soil Conservation Service ou método de hidrograma unitário. A erosão no solo e em canais, provenientes da ação das chuvas, são determinadas primeiramente pela Equação Universal de Perda do Solo. O nitrogênio total e fósforo total e DQO são parâmetros analisados no modelo. A segmentação própria do modelo pode reduzir a dificuldade de troca de dados entre os modelos, o que facilita a integração.

O WASP é um modelo de compartimento dinâmico que simula a qualidade de água ao longo da coluna d'água e nos bentos através do método de seguimentos finitos, no qual o corpo d'água é dividido em camadas de segmentos. A segmentação permite a simulação dinâmica em 3D, podendo-se analisar fósforo e mais sete parâmetros de qualidade de água. O estudo em tela concentrou-se no fitoplâncton (crescimento, morte, sedimentação e mineralização) e no fósforo orgânico e inorgânico. A carga interna é determinada pelas taxas de retiradas de fósforo, taxas de sedimentação, coeficientes de transferência e gradientes de concentração entre o sedimento e o tamanho da fase líquida. Os critérios de segmentação do WASP incluem: a minimização do volume do seguimento para diminuir a dispersão numérica; seleção apropriada do tamanho que pode expressar a média representativa da distribuição das

concentrações de qualidade de água; requer divisão vertical se houver estratificação na coluna d'água.

Para aplicação da metodologia, a bacia hidrográfica onde se localizam o Rio Sanpin e a Represa Posan foi dividida em pequenos elementos chamados de quadrículas ou grid (AGNPS) e de seguimentos (WASP) de tamanhos fixados em 120 m x 120 m , pois tamanhos menores demandariam maior tempo computacional. O corpo d'água foi dividido em duas camadas devido a estratificação existente à 8m de profundidade, resultando num total de 66 seguimentos, dos quais 26 representaram a camada superior, 20 representaram a camada inferior da Represa Posan e 20 representaram a camada bentônica.

A simulação das cargas externas do AGNPS foi implementada em um período de janeiro a abril de 1994, cuja verificação foi feita sobre um período de 3 anos de amostragem dos sedimentos e comparação com dados coletados nos eventos de chuva. Para o uso do WASP foram necessários: análises de laboratório para determinação das taxas de retirada de fósforo em condições aeróbicas e anaeróbicas; estimativa teórica e; dados citados em estudos anteriores. Devido o WASP simular ortofosfato, fósforo inorgânico, nitrogênio amoniacal, nitrato e nitrogênio orgânico e, o AGNPS simular fósforo solúvel, fósforo adsorvido no sedimento e fósforo total, foi necessária a implementação de taxas de conversão entre esses parâmetros com o uso de hidrogramas, sendo simuladas as frações de ortofosfato contido no fósforo solúvel e as frações de nitrogênio amoniacal, nitrato e nitrogênio orgânico dentro de nitrogênio total, durante o escoamento superficial.

O modelo construído foi calibrado para o WASP para as mudanças de volume. As cargas externas foram obtidas do AGNPS, sendo o modelo calibrado para o período de janeiro a

março de 1994 e verificado para o mês de abril de 1994. A carga interna da represa foi determinada usando o modelo dinâmico baseado nos seguimentos do WASP e baseados na carga externa resultante do AGNPS em intervalos diários de tempo.

2.5 Conclusões Preliminares

É possível concluir que para a escolha e/ou adoção de um modelo, seja de quantidade ou de qualidade de água, é preciso:

- definir o(s) processo(s) que se deseja simular;
- verificar os modelos existentes na literatura e no mercado capazes de simular esse(s) processo(s);
- na ausência do modelo necessário, analisar a possibilidade de desenvolvê-lo na forma de um software com interface homem-máquina amigável;
- analisar se o modelo dispõe de parâmetros e rotina de calibração;
- conhecer o tempo necessário para se atingir uma boa calibração;
- verificar se os dados disponíveis (série histórica) para as etapas de calibração e simulação estão compatíveis com os dados requeridos pelo modelo;
- na falta de dados disponíveis, verificar quanto a geração de dados poderá comprometer os resultados do modelo;
- conhecer a precisão e a garantia dos resultados do modelo face à sua formulação.

O desenvolvimento de pesquisas científicas e o avanço da microinformática permitiram que inúmeros modelos matemáticos de quantidade e de qualidade de água fossem concebidos e aplicados a diversos fins e, com certeza, outros serão criados e os existentes poderão ser sempre aprimorados.

As limitações, para utilização de cada modelo, de forma isolada ou integrada a outros modelos, ocorrerão em função dos objetivos de aplicação, ou seja, do fenômeno que está sendo simulado, da resposta esperada, do tempo e recursos financeiros disponíveis para sua aplicação e/ou desenvolvimento e, principalmente, do volume de dados disponíveis para sua aplicação.

Torna-se, portanto, muito difícil afirmar quais são os modelos mais indicados para um determinado fim, devido ao universo de modelos existentes. Entretanto, sempre é aconselhável testar os diversos modelos, incluindo os já citados anteriormente, para adoção por uma empresa ou instituição gerenciadora de recursos hídricos.

Antes e após a adoção de um ou alguns modelos é fundamental o treinamento e aperfeiçoamento contínuo de equipes multidisciplinares que possam desenvolver ou aplicar tais modelos.

Face ao exposto, procurou-se escolher dois modelos que pudessem representar um ambiente de uma represa de forma a refletir os possíveis impactos na qualidade de água com base no gerenciamento e operação das estruturas hidráulicas de retirada de água.

O volume de dados disponíveis e o tempo de desenvolvimento do trabalho levaram à indicação do CE-QUAL-R1 e do ACQUANET como possíveis modelos a serem integrados, similarmente ao SIAM e ao MODSIMQ. Além disso, considerou-se o fato do ACQUANET ser consagrado nacionalmente, notadamente nos trabalhos de Roberto (2002) e Castro (2003) e o fato do CE-QUAL-R1 ainda não dispor de uma INTERFACE para sua utilização.

3. DESCRIÇÃO DO MODELO ACQUANET

Desenvolvido originalmente por John W. Labadie e conhecido primeiramente como MODSIM³⁵, o ACQUANET surgiu para resolução de problemas de alocação de água em bacias complexas, utilizando: um algoritmo de balanço de massa para simulação e o algoritmo *Out-of-Kilter* (Ford e Fulkerson, 1963 apud Solis e Jansen, 2002) para otimização (Albano e Porto, 2003).

3.1 Características do ACQUANET

Segundo Porto et al. (1997), os atributos mais importantes do ACQUANET são:

- faz simulação de rede de fluxo de volumes armazenados em represas e da distribuição de vazões em um sistema complexo de recursos hídricos em uma bacia hidrográfica, inclusive a operação de represas em intervalos de tempo semanal ou mensal;
- inclui a capacidade de otimizar a operação de sistemas mediante a utilização de um algoritmo desenvolvido especificamente para a solução eficiente de problemas de minimização de custo em redes de fluxo. Os custos, nesse caso, não precisam ser monetários, podendo representar fatores hierárquicos ou de ponderação que sirvam para colocar as alternativas operacionais em ordem de prioridade;

³⁵ O MODSIM foi alterado da linguagem original escrita em Fortran para a linguagem MS-Visual Basic e, ao longo de seu desenvolvimento, seu nome foi alterado pelo LabSid de MODSIM para MODSIMP32, MODSIMLS e atualmente é conhecido nacional e internacionalmente como ACQUANET.

- o modelo pode ser usado para formulação de diretrizes operacionais de curto prazo (semanal) ou em longo prazo (sazonal ou plurianual). A otimização de rede, para atender as metas operacionais é executada semanal ou mensalmente de forma seqüencial, e não por um processo plenamente dinâmico, uma vez que este supõe conhecimento prévio de influxos futuros, o que é impossível em problemas práticos de recursos hídricos.

O princípio básico para utilização do ACQUANET é que o sistema de recursos hídricos possa ser representado como rede de fluxo. Os componentes do sistema são representados nas redes na forma de **nós** de volume (represas) e nós que não são de volume, também chamados nós de passagem (confluências, pontos de desvios, pontos de entrada e pontos de demanda) e **arcos** ou **elos** (canais, adutoras e trechos naturais de rio). A fim de considerar as demandas, vazões afluentes e as normas de operação desejadas da represa, diversos nós *artificiais* e arcos *artificiais* deverão ser criados de tal forma a assegurar que o balanço de massa seja satisfeito em toda a rede (figura 3.1). Esses nós *artificiais* e arcos *artificiais* são criados automaticamente pelo ACQUANET, de tal forma que o usuário só precisa se preocupar com a criação dos nós *reais* e arcos *reais* do sistema (Porto et al., 1997).

Segundo Porto et al. (1997), as hipóteses básicas vinculadas ao modelo são as seguintes:

- todos os nós de armazenamento e arcos do sistema devem possuir limites (deve-se especificar os valores máximos e mínimos para os volumes das represas e para a capacidade dos arcos). Permite-se que a capacidade dos arcos varie ao longo do tempo. As perdas resultantes da evaporação e da infiltração são consideradas iterativamente;
- cada arco deve ser unidirecional no que diz respeito ao sentido de fluxo;
- todos os influxos, demandas e perdas por infiltração e vazões de retorno devem se acumular nos nós. Ao se aumentar a densidade dos nós na rede, aumenta-se a precisão da simulação.

3.2 Funcionamento do ACQUANET

A cada iteração, o algoritmo *Out-of-Kilter*³⁶ (Clausen, 1968³⁷ apud Labadie, 1993; Kennington e Helgason, 1980³⁸ apud Marins et al., 1997; Labadie, 1995; Roberto, 2002), resolve a seguinte equação matemática (função-objetivo):

$$\bullet \text{ Minimizar } \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N C_{ij} * Q_{ij} \quad (3.1)$$

onde: Q_{ij} = vazão média entre o nó i e nó j no intervalo de tempo considerado; C_{ij} = custo unitário associado com a vazão Q_{ij} representando prioridade operacional para alocação de água (fator de ponderação). O modelo deverá atender às seguintes restrições:

$$\bullet \text{ Equilíbrio de massa: } \sum_{i \in I_j} Q_{ij} - \sum_{k \in O_j} Q_{jk} = 0 \quad (3.2)$$

onde: I_j = conjunto de nós cujos arcos terminam em j ;

O_j = conjunto de nós cujos arcos iniciam no nó j .

$$\bullet \text{ Vazão mínima : } Q_{ij} \geq L_{ij} \quad (3.3)$$

onde: L_{ij} = vazão mínima nos arcos (i,j)

$$\bullet \text{ Vazão máxima: } Q_{ij} \leq U_{ij} \quad (3.4)$$

onde: U_{ij} = vazão máxima nos arcos (i,j)

Cada arco ou elo da rede de fluxo é definido por três parâmetros cuja configuração é: $[L_{ij}, U_{ij}, C_{ij}]$, onde: i e j são nós da rede; L_{ij} é o limite mínimo ou inferior do elo (i,j) ; U_{ij} é o limite máximo ou superior do elo (i,j) e C_{ij} representa o custo ou peso entre os nós i e j .

³⁶ O funcionamento do algoritmo Out-Of-Kilter e um exemplo do mesmo estão descritos no Anexo A.

³⁷ CLAUSEN, R. The Numerical solution of network problems using the out-of-kilter algorithm. Rand Corporation. RM-5456-PR. Santa Monica. California, 1968.

³⁸ KENNINGTON, J. L; HELGASON, L. V. Algorithms for Network Programming. Nova Iorque, 1980.

O modelo resolve as seguintes iterações ao longo de cada intervalo de tempo:

- assunção de valores iniciais de C_{ij} , L_{ij} , U_{ij} resolvendo a rede;
- atualização de C_{ij} , L_{ij} , U_{ij} com base nas Vazões Q_{ij} ;
- nova resolução da rede com a atualização dos parâmetros obtendo-se novas Q_{ij} ;
- repetição do procedimento de sucessivas vazões Q_{ij} estimadas nos intervalos subseqüentes, até que haja convergência dentro de uma tolerância previamente estabelecida pelo usuário.

Para uma dada rede definida pelo usuário (figura 3.1) contendo, por exemplo, um nó de represa (R), um nó de demanda (C) e um elo de ligação entre os nós 1 e 2, o modelo constrói automaticamente um nó artificial de vazão afluente e de volume inicial (I), um nó artificial de volume a ser transportado para o período subseqüente (S), um nó artificial de vertimento (SP), um nó artificial de demandas (D) e um nó artificial de balanço de massa (M), além dos elos artificiais conectando os elementos reais e artificiais citados.

Os elementos da rede de fluxo desenhada (figura 3.1) deverão ter como definição as vazões naturais reais (ou geradas artificialmente) de entrada em qualquer nó real criado pelo usuário. Para os nós de passagem o modelo cria um único nó artificial (I) que se interliga com os reais por elos artificiais. Os limites inferior e superior dos elos serão iguais se os nós de entrada forem nós de passagem $[I_j, I_j, 0]$. Os limites inferior e superior serão iguais, porém somados a um valor de armazenamento, se os nós de entrada representarem represas $[I_j+S_j, I_j+S_j, 0]$.

Para cada represa real o modelo cria um único nó artificial (S) para armazenamento interligando-o à represas por dois arcos sendo que um representa o “arco de volume meta”, cujo limite mínimo $[S_{iMin}]$ e limite máximo $[T_i]$ são definidos previamente pelo usuário, e outro é um “arco artificial” usado para volumes superiores ao volume meta com limite

mínimo $[0]$ e máximo $[Si_{Máx}-Ti]$; o modelo cria um único nó artificial (SP) para vertimentos, interligando-o à represa por um terceiro elo (figura 3.1).

- Legenda:
- Nó Artificial SP = Vertimento - SPILL
 - Nó Artificial I = Origem dos Influxos (volume inicial e vazão afluente)
 - Nó Artificial S = Armazenamento - STORAGE (volume a ser transportado para o mês subsequente)
 - Nó Artificial D = Demanda
 - Nó Artificial M = Balanço de Massa
 - Nó Real R = Represa
 - Nó Real C = Demanda de Consumo ou Passagem
 - = Elo Real entre os nós reais
 - = Elo Artificial de Balanço de Massa
 - = Elo Artificial de Volume Final
 - = Elo Artificial de Volume Meta
 - = Elo Artificial de Vazão Vertimento
 - = Elo Artificial de Demanda

Figura 3.1 - Elos e Nós Reais e Artificiais do Modelo ACQUANET³⁹

³⁹ Fonte: Porto et al. (1997).

Internamente o ACQUANET trabalha em geral com números inteiros (Porto et al., 1997). Desta forma, as vazões introduzidas pelo usuário, por exemplo, vazões de demanda, capacidade máxima ou mínima de fluxo, vazões naturais introduzidas nos nós etc. são automaticamente transformadas pelo modelo em volumes mensais (ex.: $1 \text{ m}^3/\text{s} = 2592000 \text{ m}^3$ no mês). Em consequência, os volumes resultantes referentes às demandas e aos arcos são transformados em vazões para visualização do usuário (ex.: 1296000 m^3 no mês = $0,5 \text{ m}^3/\text{s}$).

Os custos nos arcos são calculados pelo modelo através das prioridades definidas pelo usuário, cujos valores devem estar entre 1 e 99. Com referência às represas, o usuário define uma prioridade para o volume meta (H_i) e uma prioridade para o volume mínimo (L_i) com base na equação de custo e prioridade usada pelo modelo. Sabe-se que quanto mais perto o volume calculado estiver do mínimo, menor será o benefício. O modelo tenderá a armazenar água nas represas de maior prioridade da rede. A equação de custo e prioridade é dada por:

$$C = -1000 + P * 10 \quad (3.5)$$

onde: P é a prioridade na situação do volume calculado e C é um número negativo que representa um benefício vinculado ao volume meta.

Da mesma forma, o usuário define as prioridades para as demandas terminais (ou consuntivas) da rede, o que em termos reais podem representar a captação por uma cidade, indústria, agricultura etc. Em caso de ocorrência de déficit na rede, o modelo tenderá a atender àquelas demandas cuja prioridade for maior, prejudicando o atendimento às demandas de prioridade menor.

Como pode-se atribuir prioridades tanto para volumes meta como para demandas, o modelo atende ao nó que apresentar a maior prioridade e, sendo assim, caso exista uma demanda com prioridade maior que a do volume meta, o modelo atende primeiramente a demanda e, se possível, busca atingir o volume meta; quando o volume da represa for superior ao volume meta, a água excedente poderá ser utilizada em qualquer demanda, desde que garanta o menor custo no balanço da rede (Castro, 2003).

A fim de se evitar que o modelo não consiga chegar a uma solução viável, quando da ocorrência de excesso de água na rede, o usuário deverá inserir em qualquer rede desenhada, no elo terminal de jusante e de grande capacidade, um último nó com capacidade zero e baixa prioridade que drenará todo o excesso para o nó artificial SP (vertimento).

Mês a mês a equação de *Custo x Prioridade* citada anteriormente é resolvida para toda a rede de forma que ela tenha como resultado o menor custo otimizado possível, ou em outras palavras o maior benefício otimizado possível.

Uma forma de se alterar as prioridades em função da variação de volumes é usar a simulação na forma de **Estados Hidrológicos** ao invés de **Calibração**. Em Estados Hidrológicos, o usuário poderá definir a represa em três níveis de armazenamento como seco, médio e úmido, atribuindo as prioridades para cada um desses níveis a cada intervalo de tempo de simulação, o que não ocorre em Calibração, onde apenas um nível de volume meta é definido em cada intervalo.

Além disso, o usuário poderá optar por duas formas de simulação: **Simulação Contínua** ou **Planejamento Tático**:

Em **Simulação Contínua**, o usuário define um volume inicial para cada represa da rede e ao executar o modelo, a rede é simulada continuamente ano após ano e a cada intervalo de tempo (mensal ou semanal) até o último mês da série. Em longos períodos de simulação o volume inicial tem relevância somente no início da série, pois, segundo Castro (2003):

[...] tão logo o sistema encha (ou esvazie) pela primeira vez, a condição inicial (cheio, vazio ou outro estado qualquer) passa a ser irrelevante. Esse raciocínio não é válido quando as represas são super dimensionadas, visto que as vazões afluentes não são suficientes para encher o sistema e a condição inicial, então, passa a ter importância.

Em **Planejamento Tático**, o usuário define um horizonte inicial de volumes. O horizonte de simulação deve ser definido entre 2 e 24 meses. A primeira simulação, por exemplo, de 24 meses é executada com as vazões naturais correspondentes ao primeiro período de 24 meses. Após a primeira simulação, o cenário inicial, isto é, com os mesmos volumes iniciais definidos pelo usuário, é novamente simulado para o período subsequente de vazões afluentes de 24 meses. Neste caso, os volumes iniciais das represas são relevantes, pois o intervalo de simulação é um tanto pequeno (até 24 meses).

Em outras palavras, o que o modelo faz é utilizar uma série histórica de vazões naturais conhecidas supondo que as vazões para o próximo período histórico de vazões tendem a ser estatisticamente semelhantes às do período anterior. É como se os cenários em análise fossem transferidos no tempo para o início do período subsequente de vazões (Castro, 2003). A cada simulação os resultados são armazenados pelo modelo e após a simulação dos cenários em cada período, todos os resultados são mostrados de forma estatística.

Em ambos os tipos de simulação, as principais respostas mostradas pelo modelo serão: as **Vazões Ótimas** transferidas por cada Arco ou Elo e; os **Volumes Finais** de cada Nó que represente uma Represa.

A topologia básica do modelo ACQUANET, conforme Figura 3.2 foi definida da seguinte forma:

- Triângulo (azul): nó de represa, onde poderão ser inseridos os valores de contribuição natural, prioridade de armazenamento, taxa de evaporação etc;
- Quadrado (lilás): nó de demanda (consuntiva ou não), onde poderão ser inseridos valores de contribuição natural, prioridade de atendimento, nó de retorno caso não seja consuntiva e demanda mensal e por horizonte de simulação (1 ano, 2 anos ou mais);
- Círculo (vermelho): nó de passagem onde poderão ser inseridos os valores de contribuição natural;
- Traço com seta de direção (preto): elo ou arco de passagem de fluxo onde poderão ser inseridos os valores de capacidade máxima e mínima e custo de passagem.

As figuras 3.2 a 3.6 a seguir mostram as principais telas do modelo ACQUANET onde são inseridos respectivamente:

- cenário com os nós e arcos a serem simulados (Figura 3.2);
- vazões naturais mensais e taxas de evaporação mensais do nó (Figura 3.3);
- características físicas do nó, isto é, volumes máximo, mínimo e inicial e dados da equação cota-área-volume (Figura 3.4);
- valores de prioridade e frações de volumes-meta mensais (Figura 3.5) e;
- dados gerais contendo mês inicial de simulação, tipo de simulação - planejamento tático ou simulação contínua - e opção de cálculo – *calibração* ou *estados hidrológicos* (Figura 3.6).

Figura 3.2 - Tela do ACQUANET v. 2.20 com destaque do Sistema Cantareira no cenário

Dados do Reservatório Rep_Jag_Jac

Características físicas Prioridade / Volume Meta **Vazão natural / Evaporação**

Vazão natural (m³/s)

Ano / Mês	Set	Out	Nov	Dez	Jan	Fev	Mar
1983	72.601	62.708	60.898	75.366	51.936	35.732	24.843
1984	15.603	10.510	11.700	23.668	37.637	39.133	42.644
1985	19.606	12.013	13.703	13.870	20.407	28.333	30.244
1986	7.516	9.103	12.003	54.769	42.867	43.003	40.554
1987	18.806	17.113	15.603	15.969	36.797	40.923	49.544
1988	12.686	18.313	18.503	18.169	51.837	59.333	45.644
1989	15.516	11.853	13.102	19.069	52.157	16.913	33.224
1990	14.386	16.493	13.372	14.769	28.937	43.932	59.544
1991	11.305	26.713	12.702	20.169	17.737	19.932	21.244
1992	14.875	26.533	31.902	28.769	25.637	44.932	35.844
1993	17.705	16.313	8.852	13.169	47.690	47.320	34.040

Taxa de Evaporação (m/mês)

Meses	Set	Out	Nov	Dez	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago
Evaporação	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

Ok Cancelar

Figura 3.3 - Tela do ACQUANET com dados de vazão natural da Represa Jaguari-Jacaré

Dados do Reservatório Rep_Jag_Jac

Características físicas | Prioridade / Volume Meta | Vazão natural / Evaporação

Identificação
Nome do reservatório: Rep_Jag_Jac

Volumes característicos
Volume máximo (Mm³): 595.000
Volume mínimo (Mm³): 0.000
Volume inicial (Mm³): 125.790

Tabela Cota-Área-Volume

Cota (m)	Área (km²)	Volume (Mm³)
0.000	0.000	0.000
0.000	0.000	0.000
0.000	0.000	0.000
0.000	0.000	0.000
0.000	0.000	0.000

Figura 3.4 - Tela do ACQUANET com características físicas da Represa Jaguari-Jacareí

Dados do Reservatório Rep_Jag_Jac

Características físicas | **Prioridade / Volume Meta** | Vazão natural / Evaporação

Prioridade do Volume Meta
Prioridade: 20

Volume Meta (fração do Volume Máximo)

Ano / Mês	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Jan	Fev	Mar
Ano 1	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.81	0.81	0.81	0.90
Ano 2	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.81	0.81	0.81	0.90

Figura 3.5 - Tela do ACQUANET com prioridades e volumes-meta da Represa Jaguari-Jacareí

Definições Gerais

Dados gerais
Nome do Projeto: Cant_base
Observações: regra operativa atual;
Mês inicial da simulação: Abr
Tolerância dos volumes (%): 1.00
Tolerância das demandas (%): 1.00

Opção de Cálculo
Estados Hidrológicos
Calibração

Tipo de Simulação
Simulação Contínua
Planejamento Tático

Planejamento Tático
Horizonte de simulação (anos): 2
Número de anos da série de vazões: 64
Ano inicial da série de vazões (ex: 1970): 1930

Ok Cancelar

Figura 3.6 - Tela do ACQUANET com dados gerais do cenário a ser simulado

Após a simulação, os principais resultados do modelo ACQUANET são os seguintes:

- nós: probabilidade de um determinado volume final de cada mês, ou volume final com determinada garantia (em porcentagem), definida pelo usuário na forma de uma curva de permanência de valores obtidos ao longo das rodadas de simulação;
- arcos: vazões ótimas mensais (m^3/s);
- demandas: vazões fornecidas mensais (m^3/s), anuais (m^3/s) e déficits (%).

As telas gráficas com exemplos de resultados simulados estão ilustradas nas figuras 3.7 e 3.8.

Figura 3.7 – Tela do ACQUANET com resultados de simulação – garantia (%) de volume final no nó de represa (ex.: Represa Jaguari-Jacaré com 50 % de garantia)

Figura 3.8 - Tela do ACQUANET com resultados de simulação – garantia (%) de vazões ótimas no link (ex.: Túnel 7 com 50 % de garantia)

3.3 Algumas peculiaridades do ACQUANET

O principal problema da simulação efetuada e que torna o ACQUANET um “modelo míope”, é que o modelo considera a otimização local (a cada mês) e não global (na série toda) para minimização dos custos, o que poderá incorrer em situações de volumes zerados nas represas em certos intervalos de tempo, consecutivos ou não da simulação, de forma a atender às maiores prioridades, sejam elas em um nó de demanda ou de represa, ao passo que uma operação de diminuição destas vazões antes do esvaziamento das represas poderia significar uma política operacional mais adequada (Castro, 2003). Um exemplo dessa situação pode ser notado na Figura 3.7 onde em pelo menos 50 % dos casos houve esvaziamento total da represa no mês de novembro do 1º ano de simulação.

Represa com volume zero, simulada pelo ACQUANET, poderá ocorrer se o usuário adotar a seguinte situação: usar o volume operacional real da represa e neste caso, para volumes zerados, interpretar-se-á que a represa não está sem água, mas sim no seu nível d'água mínimo operacional. Abaixo deste nível, portanto, existe ainda o seu volume morto somado ao seu volume referente ao nível d'água mínimo *minimorum*.

Uma forma de contornar a situação de volumes zerados é adotar o seguinte procedimento: utilizar um volume operacional máximo fictício menor que o volume operacional máximo real, ou quanto menor desejar o usuário. Neste caso, se o volume operacional simulado pelo modelo ficar em zero, interpreta-se que determinada represa não está sem água, mas sim com aquela variação de volume que foi reduzido pelo usuário. Por exemplo, se o volume máximo operacional for 605 hm³ para determinada represa, pode-se adotar um volume máximo de 595 hm³ para simulação do modelo. Se em determinado mês ocorrer zero, significa que ainda existem 10 hm³ armazenados. Recomenda-se o cuidado de não adotar valor fictício tão defasado do real, pois poderá ocorrer uma situação muito diferente da esperada.

Outra dificuldade do ACQUANET, devido à simplificação da situação real para a rede de fluxo, é não poder explicitar restrições hidráulicas operacionais, como por exemplo, redução de vazão máxima em determinado elo em função do volume armazenado estar abaixo do mínimo para retirada de uma vazão-objetivo, isto é, por falta de carga hidráulica mínima ou coluna d'água mínima. Esse caso poderá ser contornado definindo-se, por exemplo, um volume mínimo armazenado, para retirada da vazão desejada, equivalente ao nível da carga hidráulica mínima de captação ou transferência, ou adotar volume mínimo superior ao real. Contudo, caso ocorram volumes armazenados iguais ao mínimo, uma vazão calculada pelo modelo poderá estar zerada ao invés de ser apenas menor que a vazão-objetivo.

Uma outra forma de se contemplar restrições hidráulicas é transformar um nó de represa, por exemplo, em diversos nós de represa com prioridades diferentes de volume meta.

Como se trata de um modelo elo-nó que trata puramente de quantidade de água disponível na rede, a qualidade de água pode ser indiretamente considerada pelo ACQUANET se, baseado em experiência operacional, forem definidas vazões mínimas em alguns arcos para garantir diluição de algum constituinte de qualidade de água nos nós de demanda de jusante ou definir níveis mínimos de armazenamento nos nós de represa para garantir um nível de concentração dos constituintes de qualidade da água.

Como afirmado anteriormente no Capítulo 2, é fundamental que a simulação de vazões (quantidade) a serem adotadas (retiradas e / ou descarregadas) para a operação de uma represa, seja acompanhada da simulação por um modelo matemático de qualidade de água, principalmente para conhecimento das possíveis alterações na coluna d'água da represa. Justifica-se, portanto, a necessidade de se poder simular conjuntamente quantidade e qualidade de água, objeto do presente trabalho, de forma a prever uma possível situação, simulada por um modelo de qualidade, tal como o CE-QUAL-R1, em função de uma operação quantitativa simulada pelo ACQUANET.

Desta forma, as **Vazões Ótimas** e **Volumes Finais** simulados pelo ACQUANET poderão ser lidos estatisticamente pela INTERFACE proposta no presente trabalho, sendo inseridos como dados de entrada do modelo CE-QUAL-R1 que simulará o perfil de qualidade da represa.

4. DESCRIÇÃO DO MODELO CE-QUAL-R1

Desenvolvido pelo U.S. Army Corps of Engineers e originário do modelo Water Quality for River-Reservoir Systems – WQRRS (Chen e Orlob, 1972) o CE-QUAL-R1 (Eiker E., Bushman J., Gottesman J.L., 1982) é um modelo matemático de qualidade de água que descreve as distribuições verticais da energia térmica e de materiais químicos e biológicos em uma represa ao longo do tempo.

É usado para estudar: problemas de influxos e defluxos de água, efeitos das operações de gerenciamento de represas, eutrofização e possíveis condições anaeróbicas. É capaz de simular a dinâmica de até 27 parâmetros de qualidade ao longo da coluna d'água, incluindo 11 parâmetros relativos ao sedimento. O modelo requer um extenso banco de dados incluindo condições iniciais, coeficientes físicos e geométricos, taxas de reação química e biológica e seqüências temporais de dados hidrometeorológicos.

O CE-QUAL-R1 é espacialmente de uma dimensão; gradientes de temperatura e concentrações são simulados somente na direção vertical, isto é, a represa é processada como uma seqüência vertical de camadas horizontais, conforme ilustrado na Figura 4.1, as quais a espessura depende do balanço de massa de água.

A distribuição da quantidade de entrada e saída de água nas camadas horizontais é baseada nas diferenças de densidade. Nas simulações estão incluídos os fluxos de superfície de meio e de fundo. Além disso, é possível simular retiradas de água em diferentes alturas.

Figura 4.1 – Representação geométrica de represa em camadas e mecanismos de transporte de massa⁴⁰

A interação de vários fatores químicos e biológicos é a principal característica do CE-QUAL-R1. O modelo simula interações de fatores físicos (tais como o fluxo e a temperatura), fatores químicos (como nutrientes) e fatores biológicos em ambientes aeróbicos e anaeróbicos.

O modelo ainda conta com alguns pré-processadores, um compartimento de análise térmica (CE-THERM-R1) e ainda pode fazer simulações estocásticas utilizando o método de Monte Carlo.

⁴⁰ Fonte: Manual do Modelo CE-QUAL-R1 (Eiker et al., 1995).

O CE-QUAL-R1 assume que a dinâmica de cada componente físico, químico e biológico pode ser descrita pelo princípio da conservação de massa. O modelo considera: massa adicionada pelos influxos; massa removida pelos defluxos; difusão de massa; mudanças internas devido aos processos ecológicos.

Devido às equações não serem resolvidas de forma fechada, pode ocorrer erros numéricos menores relativos à conservação de massa (Eiker et al., 1995).

Os fatores físicos considerados pelo CE-QUAL-R1 são: radiação solar de ondas curtas e longas na superfície da água; rede de transferência de calor através da interface ar-água; transferência de calor radiativo e convectivo com o corpo d'água; instabilidades de densidade de mistura convectiva; localização de profundidade das entradas de água com densidade compatível; retiradas de águas profundas influenciadas pela estrutura de saída (altura das tomadas d'água), taxas de descarga, e densidade de estratificação; substâncias conservativas; sólidos suspensos.

Os fatores biológicos considerados pelo CE-QUAL-R1 são:

- acumulação, dispersão e depleção de oxigênio dissolvido em função da aeração, fotossíntese, respiração e decomposição orgânica;
- dinâmica de excreção e regeneração de nitrogênio e fósforo e os processos de nitrificação e denitrificação sob condições aeróbicas e anaeróbicas;
- ciclo do carbono e dinâmica das interações de alcalinidade;
- dinâmica e relações de macrófitas e fitoplâncton;
- transferências de níveis tróficos mais altos da cadeia alimentar;
- acumulação, dispersão e decomposição de detritos e sedimentos;

- mortalidade de bactérias e coliformes;
- acumulação, dispersão e re-oxidação de ferro, manganês e sulfatos quando da prevalência de condições anaeróbicas.

As limitações do CE-QUAL-R1 são:

- variações longitudinais e laterais nos constituintes de qualidade de água não podem ser previstas;
- todas as quantidades de influxos e constituintes são instantaneamente misturadas nas camadas horizontais;
- as previsões do modelo são mais representativas para as condições de qualidade de água próximo da barragem ou na parte mais profunda da represa;
- o modelo não considera competição entre espécies;
- o modelo não prevê número preciso de algumas espécies;
- o modelo não considera todos os processos ecológicos que ocorrem numa represa;
- a complexidade natural de interações químicas e biológicas, sob certas condições, não pode ser simulada em grandes detalhes para ambientes anaeróbicos. O modelo restringe-se a espécies químicas reduzidas que historicamente mostraram-se problemáticas no gerenciamento de represas e lagos;
- para represas com número maior que dois tributários o modelo faz uma homogeneização das vazões e concentrações afluentes de forma a distribuí-las nas camadas ao longo da coluna vertical.

Dentre as características do CE-QUAL-R1 estão:

- tempo, extensão e duração da estratificação térmica;
- localização da tomada d'água seletiva requerida para atender uma temperatura-objetivo;

- efeito das modificações estruturais na qualidade da água;
- o desenvolvimento de condições anóxicas;
- magnitude, composição e duração de blooms algais;
- fatores que afetam o crescimento de algas e macrófitas;
- efeitos dos eventos de tempestades sobre a qualidade da água;
- efeitos de uso das terras sobre os afluentes;
- efeitos de alterações de operação de projeto, tais como alterações de nível permitido, mudança nos índices mínimos e máximos permitidos, mudanças de elevação de nível d'água, desestratificação e mudanças nas operações programadas.

A estrutura de cada compartimento do CE-QUAL-R1 é representada por uma equação diferencial que expressa a conservação de massa ou energia em cada camada horizontal i . A equação geral é dada por:

$$\frac{d}{dt}(V_i C_i) = A_{i1} C_{i-1} + A_{i2} C_i + A_{i3} C_{i+1} + P_i, \quad i = 2, \dots, n-1 \quad (4.1)$$

onde: C = concentração

V = volume da camada

A = fator que inclui efeitos dos índices químicos e biológicos de transporte os quais as concentrações são dependentes

P = fator que inclui influxo e outras transferências químicas e biológicas que são independentes da concentração

Ou: [taxa de mudança de massa (g/h)] = Σ [taxa de influxo de massa advectiva (g/h)] – [taxa de defluxo de massa advectiva (g/h)] + [taxa de massa de influxo de rede difusiva (g/h)] +

[taxas de fonte de massa química, física e biológica] – [taxas de deposição de massa química, física e biológica].

Matematicamente a equação é expressa, segundo Eiker et al. (1995), da seguinte forma:

$$\frac{\partial}{\partial t}(VC) = \sum_k Q_{in}C_{in} - Q_{out}C + \frac{\partial}{\partial z}(DA \frac{\partial C}{\partial z})\Delta Z + F - Dc \quad (4.2)$$

onde: V = volume da camada (m³)

C = Concentração do constituinte (g/m³)

k = índice para tributários

Q_{in} = vazão afluyente da camada (m³/h)

C_{in} = concentração do constituinte afluyente (g/m³)

Q_{out} = Vazão defluente (m³/h)

D = coeficiente de difusão (m²/h)

A = área da superfície da camada (m²)

ΔZ = espessura da camada (m)

t = tempo (h)

z = elevação da camada (m)

F = taxa de produção ou fonte de constituinte (g/h)

Dc = taxa de decaimento de constituinte (g/h)

O intervalo computacional entre as simulações é de no mínimo 01 hora. Seu tempo máximo de computação é de 01 ano.

4.1 Principais Operações que Definem a Dinâmica do Modelo CE-QUAL-R1

4.1.1 Sub-rotina PDCIDE

Utilizada para escolher automaticamente os fluxos de cada porta da tomada seletiva a fim de se atingir uma temperatura-objetivo para o fluxo d'água. Neste caso, os fluxos de cada porta são determinados antes que as camadas sejam redimensionadas na Sub-rotina LAYERS.

Esta rotina compara a temperatura-objetivo com a temperatura adjacente para cada porta e tenta misturar os fluxos de saída para atingir a temperatura desejada. Para uso dessa rotina é preciso especificar para o modelo quais são os fluxos máximos e mínimos de cada porta, o que poderá interferir no cálculo para encontrar a temperatura-objetivo desejada.

Esta rotina não será usada no presente trabalho.

4.1.2 Sub-rotina radiação (RADIATE)

Nesta rotina as atualizações meteorológicas são usadas para cálculo do estoque de calor da represa. Os componentes dessa rotina são: radiação de ondas curtas, radiação de ondas longas, radiação de retorno, perda de calor por evaporação (para estoque de água na represa) e fator condutivo-convectivo.

A radiação solar é escrita da seguinte forma:

$$Q_{ns} = F_r * F_c * F_s * \frac{Q_o}{R^2} \sin \alpha \quad (4.3)$$

onde: Q_{ns} = radiação solar na superfície da água (kcal/m²/s)

F_r = fator de reflexão

F_c = fator de cobertura de nuvens

F_s = termo de transmissão atmosférica

Q_o = incidência de radiação solar nos limites externos da atmosfera (cerca de 0.33 kcal/m²/s)

α = ângulo do sol (rad)

R = distância relativa terra-sol

R e F_s são expressos da seguinte forma:

$$R = 1 + 0.017 * \cos \left[\frac{2\pi}{365} * (186 - NDia) \right] \quad (4.4)$$

onde: $NDia$ = dia Juliano

$$F_s = \frac{a'' + 0.5 * (1 - a' - d)}{1 - 0.5 * k * (1 - a' + d)} \quad (4.5)$$

onde: a'' = coeficiente médio de transmissão atmosférica após dispersão e absorção

a' = coeficiente atmosférico médio

d = coeficiente de atenuação devido poluição

k = coeficiente de reflexão ou albedo

A radiação de ondas longas é dada por:

$$Q_{NA} = 1.23 * 10^{-16} * (T_a + 273)^6 * (1 + 0.17 * C^2) \quad (4.6)$$

onde: Q_{NA} = radiação atmosférica de ondas longas (kcal/m²/s)

T_a = temperatura do ar no bulbo seco (°C)

C = fração de cobertura de nuvem

A radiação de retorno é dada por:

$$Q_b = 0.97 * \sigma * (T+273)^4 \quad (4.7)$$

e na forma simplificada pelo modelo fica:

$$Q_b = \gamma_j * \delta_j * T \text{ com } j = 1, 2, \dots, 8 \quad (4.8)$$

onde: Q_b = é a radiação de retorno (kcal/m²/s)

σ = constante de Stefan-Boltzmann

T = temperatura da superfície da água (°C)

γ_j e δ_j cada um com oito valores relativos à faixa de temperatura da água variando a cada 5°C entre 0°C e 40°C

A perda de calor por evaporação é descrita pela seguinte equação:

$$Q_e = \rho * L * (a + b * W) * (e_s - e_a) \quad (4.9)$$

onde: Q_e = perda de calor por evaporação (kcal/m²/s)

L = calor latente de vaporização (kcal/kg)

ρ = densidade da água (kg/m³)

a = coeficiente empírico (m/mb-sec)

b = coeficiente empírico (1/mb)

W = velocidade do vento (m/s)

e_s = pressão de vapor de saturação na temperatura da superfície da água (mb)

e_a = pressão de vapor de saturação na temperatura do ar (mb), com:

$$e_a = 2.171 * 10^8 \exp\left(\frac{-4.157}{T_d + 239.09}\right) \quad (4.10)$$

para: T_d = temperatura do ponto de orvalho (°C)

e_s foi simplificado da seguinte forma:

$$e_s = \alpha_j + \beta_j * T \quad (4.11)$$

para: T = temperatura da superfície da água (°C)

α_j e β_j cada um com oito valores relativos à faixa de temperatura da água variando a cada 5°C entre 0°C e 40°C

A transferência de calor condutiva é dada por:

$$Q_c = \rho * L * (a + b * W)(C_B + 10^{-13} * P) * (T - T_a) \quad (4.12)$$

onde: Q_c = transferência de calor condutivo (kcal/m²/s)

$C_B = 0.61^\circ\text{C}^{-1}$ (taxa de Bowen)

P = pressão barométrica (mb)

De forma resumida, os fluxos de calor, com exceção da radiação solar são equacionados da seguinte forma:

$$Q^* = QNA - Q_b - Q_e - Q_c \quad (4.13)$$

linearizada da seguinte forma:

$$Q^* = F_1 - F_2 * T \quad (4.14)$$

cujos valores são:

$$F_1 = QNA - \gamma_j - L * (\alpha_j - e_a - 6.1 * 10^{-14} * P * T_a) \quad (4.15)$$

$$F_2 = L * (B_j + 6.1 * 10^{-14} * P) + \delta_j \quad (4.16)$$

$$L^* = \rho * (a + b * W) * L \quad (4.17)$$

4.1.3 Sub-rotina de Influxos (FLOWIN)

Cada camada horizontal, funcionando como uma massa homogênea, isto é, bem misturada, pode se expandir ou se contrair a partir das vazões de entrada e saída e respectivas concentrações dos contribuintes. As vazões afluentes são imediatamente misturadas nas camadas que apresentarem densidades semelhantes, ou seja, as águas mais densas serão alocadas nas camadas mais profundas e as de menor densidade, nas camadas mais superficiais. A vazão defluente, entretanto, estará relacionada com a localização das estruturas hidráulicas de retirada de água e suas geometrias de saída. A espessura mínima e máxima que cada camada pode adquirir ao longo das contrações e expansões são definidas pelo usuário como um dos parâmetros de entrada do modelo.

Para calcular a espessura da zona de influxo o modelo utiliza a seguinte fórmula:

$$d = 1.35 \left[Q * L * I / \left(A * \sqrt{g * (\Delta \rho / \rho_o)} \right) \right]^{2/3} \quad (4.18)$$

onde: d = meia-espessura da zona de influxo (m)

Q = taxa de influxo (m³/s)

L = comprimento efetivo da represa (m)

A = área da superfície inferior da camada de influxo (m²)

g = aceleração da gravidade (m²/s)

$\Delta \rho$ = diferença de densidade atual entre a camada de influxo e os limites superior e inferior da zona de entrada (kg/m³)

ρ_o = densidade da camada de entrada (kg/m³)

A equação anterior é resolvida de forma iterativa até que a camada de meia-zona seja calculada com base no influxo atual (Q) e a diferença de densidade atual ($\Delta \rho$) esteja dentro da

metade da espessura da camada média da distância entre o ponto médio da elevação de influxo e o limite superior (ou inferior) das camadas. A camada limite é reiniciada comparando a espessura calculada da meia-zona com as espessuras atuais das camadas acima (ou abaixo) da camada de influxo.

Calculada a zona de influxo, os fluxos de água são distribuídos em camadas individuais de acordo com uma função de peso-volume com a seguinte estrutura:

$$Q_{in} = (Q_t * V_i) / Z_{in} \quad (4.19)$$

que assume uma velocidade de influxo constante sobre toda a zona de influxo

onde: Q_t = influxo da camada (m^3/h)

Q_{in} = vazão do tributário (m^3/s)

V_i = volume da camada (m^3)

Z_{in} = volume da camada de influxo (m^3)

O influxo do material trazido em cada camada é expresso da seguinte forma:

$$F_{in} = Q_{in} * C_{in} \quad (4.20)$$

onde: F_{in} = taxa de influxo de materiais (g/h)

Q_{in} = influxo da camada (m^3/h)

C_{in} = concentração dos materiais de entrada (g/m^3)

O influxo da energia térmica é dado por:

$$\epsilon_{in} = Q_{in} * T_{in} * \rho_{in} * C \quad (4.21)$$

onde: ϵ_{in} = taxa de influxo da energia térmica ($kcal/h$)

Q_{in} = influxo da camada (m^3/h)

T_{in} = temperatura de influxo ($^{\circ}\text{C}$)

ρ_{in} = densidade de influxo (kg/m^3)

C = calor específico ($\text{kcal}/\text{kg}/^{\circ}\text{C}$)

4.1.4 Sub-rotinas de Fluxos de Porta, Vertedores (OUTVEL, VPORT, VWEIR)

O procedimento para cálculo da distribuição vertical de fluxos de saída inicialmente é chamado uma vez. Depois que todas as concentrações das variáveis são calculadas no poço⁴¹, o procedimento novamente é chamado para os fluxos da tomada das camadas processando as quantidades retiradas. A zona de retirada é associada com a descarga de cada porta; seus limites são encontrados resolvendo-se z_i na seguinte equação:

$$C_H * C_{Vi} * Q - Z_i^2 \sqrt{(\Delta\rho/\rho) * g * Z_i} = 0 \quad (4.22)$$

onde: $C_H = 180/\theta$ coeficiente de obstrução horizontal (adimensional)

θ = ângulo de retirada horizontal (graus)

C_{V2} = coeficiente de obstrução vertical (adimensional);

$C_{V1}=1$

$C_{V3}=1$

$$C_{V2} = \left(1 - \frac{b/D}{1 - b/D}\right)^3 \left/ \left[\frac{1}{2} * \left(1 + \frac{1}{\pi} \sin\left(\frac{b/d}{1 - b/D} \pi\right) + \frac{b/D}{1 - b/D}\right) \right] \right. \quad (4.23)$$

Q = vazão de descarga da porta (m^3/h)

$Z1$ = distância do limite de retirada superior (ou inferior) da porta (m)

$Z2$ = distância do limite da retirada restrita ao limite de retirada livre (m)

$Z3$ = distância da porta ao limite da retirada superior (ou inferior) imaginária (m)

⁴¹ Poço é assim definido como o local onde se localizam todas as tomadas d'água. Seus fluxos são misturados no poço.

$\Delta\rho$ = diferença de densidade entre a porta e o limite superior (ou inferior) da retirada
(kg/m)

ρ = densidade de água na porta (kg/m)

g = aceleração da gravidade (m²/s)

b = distância da porta ao limite da retirada de interferência (m)

d = distância do limite da retirada de interferência ao limite da retirada livre (m)

$i = 1$ para campos de fluxo com dois limites de retirada livre

$i = 2$ para campos de fluxo com um limite de retirada livre

$i = 3$ para campos de fluxo sem limite de retirada livre

Dentro desses limites, o perfil de velocidades de fluxos de saída é aproximadamente parabólico. A velocidade máxima pode ou não coincidir com a linha de centro da porta, dependendo do gradiente de densidade próximo da porta, sendo sua equação definida como:

$$\frac{Y_L}{H} = \sin^2 \left(\frac{\pi}{2} * \frac{Z_L}{H} \right) \quad (4.24)$$

onde: Y_L = distância do limite inferior da retirada à elevação da velocidade máxima (m)

H = espessura vertical total da zona da retirada (m)

Z_L = distância do limite da retirada inferior à porta (m)

Dentro da zona de retirada, a velocidade é dada por:

$$u = u_m \left[1 - \left(\frac{(y * \Delta\rho_y)}{(Y * \Delta\rho_m)} \right) \right]^2 \quad (4.25)$$

onde: u = velocidade (m/s)

u_m = velocidade máxima (m/s)

$\Delta\rho_y$ = diferença de densidade da elevação da velocidade à elevação de velocidade máxima (kg/m³)

y = distância da elevação da velocidade à elevação da velocidade máxima (m)

Y = distância da elevação da velocidade máxima à elevação do limite superior (ou inferior) (m)

$\Delta\rho_m$ = diferença de densidade da elevação da velocidade máxima devido à elevação do limite superior (ou inferior) (kg/m³)

Para a retirada sobre um vertedor, o limite superior da retirada é assumido como a superfície da lâmina d'água; o limite da retirada inferior é dado por:

$$\frac{Q}{L} - \left(C - \frac{D * H_W}{Z_o + H_W} \right) \sqrt{\frac{\Delta\rho_o}{\rho_w} * g * (Z_o + H_W)^3} = 0 \quad (4.26)$$

onde: C = coeficiente adimensional (0,54 para $Z_o \geq H_W$ e 0,78 para $Z_o \leq H_W$)

D = coeficiente adimensional (0,0 para $Z_o \geq H_W$ e 0,70 para $Z_o \leq H_W$)

Q = descarga sobre o vertedor (m³/s)

L = comprimento de abertura do vertedor (m)

H_W = distância vertical da superfície de água à crista do vertedor (m)

Z_o = distância vertical da crista do vertedor ao limite inferior da retirada (m)

$\Delta\rho_o$ = diferença de densidade entre a elevação da crista do vertedor e o limite inferior da retirada (kg/m³)

ρ_w = densidade na elevação da crista do vertedor (kg/m³)

Para um vertedor submerso, o perfil de velocidade abaixo do ponto de máxima velocidade é dado por:

$$u = u_m \left[1 - \left((y^* \Delta \rho) / (Y^* \Delta \rho_m) \right) \right]^3 \quad (4.27)$$

e acima do ponto de velocidade máxima é dado por:

$$u = u_m \left[1 - \left((y^* \Delta \rho) / (Y^* \Delta \rho_m) \right)^2 \right] \quad (4.28)$$

4.1.5 Sub-rotina de Camadas (LAYERS)

Uma vez determinados os fluxos de entrada e saída, as camadas terão os seguinte comportamento em cada intervalo computacional: a camada que tiver sofrendo influxo de água sofrerá expansão, mesmo que ultrapasse os limites máximos estabelecidos pelo usuário; quando existe defluxo da camada, a mesma perde volume mesmo que sua espessura decaia abaixo da estabelecida pelo usuário. Nos casos em que ocorrer espessura maior que definida pelo usuário, a camada é dividida em duas camadas; a que tiver sofrido diminuição abaixo do mínimo será adicionada, isto é, misturada à camada imediatamente superior. Quando as camadas são divididas ou misturadas, seus atributos geométricos são recalculados e todas as concentrações de materiais e energia são redefinidos. Esse procedimento ocorrerá até que todas as camadas estejam dentro dos limites mínimos e máximos.

4.1.6 Sub-rotina de Mistura (MIXING)

O propósito desta sub-rotina é determinar a profundidade da camada superior em que ocorre região de mistura completa, cujo valor é de cerca de 1,00m para lagos mais rasos. Os fatores determinantes são energia cinética turbulenta (ECT) vinda do influxo do vento cortante e da

mistura convectiva (variáveis de força), ambas ao longo do tempo. O equacionamento dessa rotina é dado por:

$$ECT_W = \int_{AS} CW * \Delta t * \tau dA \quad (4.29)$$

onde: ECT_W = energia cinética turbulenta do vento cortante (km^2/s^2)

AS = área da superfície da água (m^2)

C = coeficiente empírico

W^* = velocidade de cisalhamento da água (m/s)

τ = fadiga do cisalhamento na interface ar-água (kg/m^2*s^2)

Δt = discretização do tempo (s)

$$ECT_C = -C_C * Q_n * AS * Z_{mix} * g * (\alpha \Delta t / c_p) \quad (4.30)$$

onde: ECT_C = energia cinética turbulenta convectiva ($kg^2/m^2/s^2$)

C_C = coeficiente de calibração empírico

Q_n = fluxo de calor que atravessa a interface ar-água ($kcal/m^2*s$)

Z_{mix} = profundidade da região de mistura (m)

g = aceleração da gravidade (m/s^2)

α = coeficiente de expansão térmica da água ($^{\circ}C^{-1}$)

c_p = calor específico da água ($kcal/kg^{\circ}C$)

$$ECT = ECT_W + ECT_C \quad (4.31)$$

4.1.7 Sub-rotina de Calor (HEAT)

É chamada pela rotina de Mistura para calcular a radiação solar absorvida em cada camada. A absorção se dá seletivamente com a profundidade desde a superfície da água e depende do comprimento de onda da luz, da água e os materiais em suspensão. Devido às discrepâncias existentes na superfície da água, tal absorção, teoricamente exponencial conforme a Lei de Beer, foi ajustada com um coeficiente de fração β para que a radiação solar (Q_{ns}) fosse absorvida numa camada superficial de 0,6m de espessura, sendo matematicamente descrita da seguinte forma:

$$\Phi(Z) = (1 - \beta)Q_{ns}e^{-\eta Z^*} \quad (4.32)$$

onde: $\Phi(Z)$ = fluxo de radiação solar na profundidade Z (kcal/m²/s)

Z^* = profundidade de água 0,6m abaixo da camada de superfície (m)

$$\eta = \eta_w + \sum k_j C_j \quad (4.33)$$

onde: η = coeficiente de extinção (m⁻¹)

η_w = coeficiente de extinção de água limpa (m⁻¹)

k_j = coeficiente de proteção-próprio do constituinte influenciando a penetração de luz

C_j = constituintes (sólidos em suspensão, matéria orgânica particulada)

O CE-QUAL-R1 assume que sólidos suspensos, algas, zooplâncton e detritos afetam a extinção de luz.

4.1.8 Sub-rotina TRNSPT

Calcula os coeficientes de difusão e os elementos da matriz de transporte.

Os efeitos cumulativos de influxos, defluxos, correntes geradas pelo vento, ondas de fundo e superfície (fatores da energia cinética turbulenta), convecção, estabilidade da densidade de estratificação, tamanho das escalas de tempo e espaço, resultam no perfil de mistura vertical numa represa. Combinados, representam um termo de difusão efetivo que é proporcional à dissipação da energia cinética turbulenta e, conseqüentemente, à magnitude de cada fonte de energia, decrescendo em zonas de estratificação devido à invariabilidade dos gradientes de densidade.

Para represas com tempo de residência de muitos meses, o vento é a maior fonte de energia, provocando ondas internas que afetam o metalímnio e hipolímnio. A dissipação da energia por unidade de massa é expressa por:

$$DISW = ECT_w / (\rho_w * V * \Delta t) \quad (4.34)$$

onde: V = volume da represa (m³)

A energia cinética gerada pelos influxos e defluxos é dada por:

$$ECT_F = 0.5 * \rho_w * q(I) * \Delta t * (q(I) / (B(I) * \Delta Z(I)))^2 \quad (4.35)$$

onde: q(I) = taxa de fluxo (m³/s) na camada I

B(I) = largura da camada I (m)

$\Delta Z(I)$ = espessura da camada I (m)

A dissipação dessa energia por unidade de massa é dada por:

$$DISF(I) = ECT_F(I) / (\rho_w * \Delta V(I) * \Delta t) \quad (4.36)$$

Sabendo-se que o número de Richardson é definido como:

$$Ri = \left(\frac{g}{\rho_w} * \frac{\partial \rho}{\partial Z} \right) / \left(\frac{u^*}{K * D} \right)^2 \quad (4.37)$$

onde: D = profundidade da camada a partir da superfície (m)

g = aceleração da gravidade (m²/s)

ρ_w = densidade da água (kg/m³)

$\partial \rho / \partial Z$ = gradiente de densidade local (kg/m³/m)

K = constante de van Karmon (0.4)

u^* = velocidade cortante (m/s) dada por:

$$u^* = \sqrt{\tau / \rho} \quad (4.38)$$

E que o número densimétrico de Froude é dado por:

$$Fr = u / ((\Delta \rho / \rho) * g * \Delta Z)^{1/2} \quad (4.39)$$

onde: u = velocidade longitudinal (m/s)

$\Delta \rho$ = variação de densidade local (kg/m³)

ΔZ = espessura da camada (m)

Então o coeficiente de difusão vertical turbulenta para a *interface ar-água* é:

$$DC(I) = \Delta t^2 * \left\{ \left[\frac{CDIFW * DISW}{1 + Ri} \right] * \left[\frac{CDIFF * (DISF(I) + DISF(I+1))/2}{1 + (1/Fr)^2} \right] \right\} \quad (4.40)$$

onde: CDIFF e CDIFW são parâmetros de calibração variando entre 0 e 1 (m²/h)

DC(I) é calculado para ser menor que o coeficiente de difusão molecular para temperatura de valor 0.0005148 m²/h sendo permitido pelo modelo valor máximo de 20.0 m²/h

4.1.9 Sub-rotina RMULT

Calcula a temperatura de dependência de cada parâmetro, uma vez que, a maioria das taxas químicas e biológicas é influenciada pela temperatura. A representação matemática desta dependência, segundo Thornton e Lessem (1978) é dada por:

$$R(T) = \begin{cases} 0 & T \leq T_1 \\ \frac{K_1 * e^{\lambda_1(T-T_1)}}{1 + K_1 * [e^{\lambda_1(T-T_1)} - 1]} * \frac{K_4 * e^{\lambda_2(T_4-T)}}{1 + K_4[e^{\lambda_2(T_4-T)} - 1]} & T_1 < T < T_4 \\ 0 & T \geq T_4 \end{cases} \quad (4.41)$$

onde:

$$\lambda_1 = \frac{1}{T_2 - T_1} \ln \left[\frac{K_2(1 - K_1)}{K_1(1 - K_2)} \right] \quad (4.42)$$

$$\lambda_2 = \frac{1}{T_4 - T_3} \ln \left[\frac{K_3(1 - K_4)}{K_4(1 - K_3)} \right] \quad (4.43)$$

K é a taxa multiplicadora

T é a temperatura

T1 e T4 são os limites de mortalidade fornecidos pelo usuário

K1 e K4 são os limites de multiplicação

T2 e T3 são os limites de variação para K2 e K3, os quais são admitidos pelo CE-QUAL-R1 iguais a 0,98. As máximas taxas definidas pelo usuário são multiplicadas por R(T) para definição das taxas camada-a-camada

4.1.10 Sub-rotina INTEGR

Esta rotina executa a integração da equação de conservação de massa para todas as variáveis do modelo (Sólidos em Suspensão, Zooplâncton, Fitoplâncton, Plantas ou Macrófitas, Detritos

ou Matéria Orgânica Sedimentável Fina em Suspensão, Material Orgânico e Organismos Bentônicos, DBO da Matéria Orgânica Dissolvida, Fósforo na forma Ortofosfato, Sílica, Carbono Inorgânico, Amônia, Nitrito e Nitrato, OD, componentes químicos dissolvidos), exceto peixes e parâmetros que se encontram no sedimento.

4.2 Ativação Convencional do CE-QUAL-R1

Para utilização do modelo isoladamente, o usuário deve construir um arquivo denominado CQR.DAT. Dependendo do tipo de simulação e da periodicidade dos dados de entrada, esse arquivo poderá ser um pouco extenso. Por exemplo, um arquivo com dados diários de vazões naturais de dois tributários, concentração de constituintes, valores meteorológicos e vazões retiradas (tomadas, vertedor), a extensão poderá atingir cerca de 2400 linhas.

A estrutura básica do CQR.DAT é, num espaço de 80 colunas e n linhas, é a seguinte:

- cabeçalho com pouco espaço de inserção;
- ano (em número de dias), dia de início da simulação, intervalo de tempo entre os dados de entrada (1h, 2h,...,24h, 720h), intervalo de tempo para o arquivo de saída, ano de simulação⁴²;
- tipo de estrutura de saída (vertedor, tomada seletiva), tipo de coeficiente de vento, tipo de simulação (modo de *calibração*⁴³ ou não), localização da represa (latitude, longitude,

⁴² O modelo não foi preparado para o Bug do Milênio. Portanto, 00 é lido como ano 1900, o que, no entanto, parece não afetar as simulações.

⁴³ O modo de calibração do CE-QUAL-R1 permite apenas que os valores de coeficiente de difusão turbulento sejam alterados pelo usuário. Sem o modo de calibração, o modelo adota 0.007722 m²/h como valor padrão.

- altitude), comprimento de talvegue represado, espessura máxima e mínima de variação das camadas, espessura das camadas do perfil inicial, número de tomadas, suas dimensões;
- tipo e dimensões do vertedor, equação da curva Cota x Área x Volume;
 - parâmetros de mistura e incidência de luz, parâmetros físicos, químicos e biológicos;
 - condições iniciais de cada camada contendo principalmente elevação em relação ao fundo, dados de Temperatura e concentrações de OD, pH, NH₃, P, Fe, Mn, SDT, SS, SO₄⁻² dentre outros;
 - dados meteorológicos de cada intervalo de tempo do ano contendo: cobertura de nuvens, velocidade do vento, pressão barométrica, temperatura de bulbo seco, temperatura de ponto de orvalho (é aconselhado uso de dados de estação meteorológica mais próxima possível da represa);
 - vazões retiradas em cada uma das portas da tomada seletiva e vertedor;
 - vazões do primeiro tributário e em seguida as concentrações de componentes físicos, químicos e biológicos do tributário;
 - vazões e concentrações dos demais tributários.

Pelo fato das rotinas do modelo rodarem de forma horária, é permitido que as escalas de tempo sejam variadas. Por exemplo, poder-se-á ter vazões retiradas mensalmente nas tomadas e diárias nas vazões dos tributários. O mesmo ocorre para os dados meteorológicos que podem ter escala temporal diferente das escalas das vazões. De qualquer maneira, o CE-QUAL-R1 faz os ajustes de escala temporal para que a simulação seja feita a cada 01 hora de simulação.

Após a construção do CQR.DAT, é aconselhável que o usuário rode primeiro o pré-processador CQRTSM.EXE que fará uma primeira checagem se a estrutura do arquivo está

correta, o qual indicará o máximo de até 20 erros existentes no arquivo. A análise é relatada no arquivo ROPT.DAT. O pré-processador ainda sugere a alteração de alguns parâmetros adotados pelo usuário que estejam fora da faixa de valores conhecidos na literatura. Se o ROPT.DAT não acusar erros no CQR.DAT, o próximo passo é executar o CEQUALR1.EXE o qual terá como saída o arquivo CQR.OTP. Este roteiro poderá ser seguido sem a INTERFACE em questão.

Na organização dos dados de entrada é preciso verificar principalmente se as vazões dos tributários estão corretas, pois vazões abaixo das reais acarretarão deplecionamento da represa mais rápido que o real o que poderá ser demonstrado como “WATER SURFACE BELOW PORT-OUTVEL”⁴⁴ na última linha do CQR.DAT e que provocará a interrupção imediata da simulação.

Este tipo de erro poderá ser evitado se a determinação das vazões naturais, quando usado cálculo por balanço hídrico, contiver a perda de água por evaporação (mm), uma vez que a rotina RADIATE tem a perda de evaporação inserida no seu código.

4.3 Algumas dificuldades encontradas na utilização do CE-QUAL-R1

Como o modelo foi escrito em linguagem Fortran (versão f77), os erros durante algum intervalo computacional interrompem imediatamente a rotina de simulação, como por exemplo: quando se define um dos níveis de retirada de água acima da superfície de água disponível ou quando o volume armazenado atinge um nível d'água (cota) abaixo da tomada onde foi especificada uma determinada pelo usuário uma vazão de retirada, ao invés do

⁴⁴ Superfície da Água abaixo do Nível de Saída da Porta.

modelo registrar a falta de nível e continuar com a simulação interrompendo-se a retirada naquele nível, a simulação é instantaneamente cessada.

Por motivo não conhecido, a interface gráfica do pacote permite a visualização dos dados simulados e dos dados reais referentes apenas à temperatura não sendo possível visualizar os demais constituintes.

A resposta a uma simulação do modelo é dada em relação às camadas e respectivas elevações do nível d'água. Porém, no arquivo de saída, o modelo, ao invés de adotar valores iguais a 0,01 m, adota valores múltiplos de 0,10 m como variação de nível, tornando imprecisos os valores parciais em cada camada (volume e concentração dos constituintes) bem como o valor total ao final de uma simulação.

O arquivo de entrada define a posição de cada variável a ser lida em um espaço de até oito dígitos ou colunas (ex.: 123,5678). Uma das linhas de entrada desse arquivo é relativa à equação da Curva Cota x Área x Volume. Devido à limitação do espaço de cada variável (8 colunas), os coeficientes da curva, com número de dígitos normalmente superior ao limite do modelo, são inseridos pelo usuário de forma arredondada, aumentando a imprecisão das simulações. Além disso, a equação Cota x Área x Volume é definida no máximo em um polinômio de ordem 3, simplificando as equações reais de ordem superior, incorrendo em imprecisões do volume armazenado na represa.

O valor zero introduzido pelo usuário como parâmetros de Oxigênio ou Fósforo nas condições iniciais da coluna d'água (INIT's 2 a 5) implicam em falha e parada imediata da simulação. O

pré-processador existente no pacote, desenhado para localizar falhas do usuário, não detecta esse tipo de falha.

Ainda em relação a falhas, certa linha do arquivo de entrada deveria ser feita com as letras SOUTL2, representando as retiradas de água pela comportas da tomada seletiva, sendo mostrado como erro de posição das letras pelo pré-processador. Entretanto, deixa de ser taxado de erro se as letras forem trocadas por SWRFLO, o que representam valor de vazão do vertedor. Desta forma, se o usuário quiser evitar o erro do pré-processador, deverá colocar SOUTL2 apenas no primeiro intervalo computacional, trocando as demais por SWRFLO. A permanência do contrário, apesar do erro no pré-processador, não interfere na simulação do CE-QUAL-R1. Ocorre que erros acumulados em quantidade superior a 20 não são relatados pelo modelo.

O modelo considera que as vazões retiradas na tomada seletiva são unificadas em um único poço juntamente com as comportas de fundo e vertedores. Não é possível determinar as características de qualidade de água em cada tomada d'água a cada rodada da simulação.

O modelo aceita a inserção de vazões negativas, tanto para tomadas seletivas como para vazões de tributários.

5. A INTERFACE - INTEGRAÇÃO CE-QUAL-R1 & ACQUANET

O principal objetivo do presente trabalho foi desenvolver uma metodologia que pudesse integrar dois modelos matemáticos, neste caso dois softwares, sendo um modelo de quantidade de água em rede de fluxo denominado ACQUANET e outro de qualidade de água aplicado em represas denominado CE-QUAL-R1. Para tanto, a metodologia utilizada foi aplicada com auxílio do desenvolvimento de uma INTERFACE computacional criada em ambiente Windows a partir do software MS - Visual Basic 6 – Enterprise Edition.

Em síntese, o funcionamento da INTERFACE pode ser resumido pelo fluxograma a seguir:

Figura 5.1 - Fluxograma para ativação da INTERFACE para simulação do modelo CE-QUAL-R1 com arquivos do ACQUANET. Cor amarela para procedimentos na INTERFACE

Abrangendo algumas funcionalidades, a INTERFACE contém 10 formulários e 10 módulos que são interligados ou chamados de vários pontos do programa conforme necessidade do usuário ou código interno. A metodologia adotada pode ser entendida através das principais funções dos formulários e módulos descritos a seguir.

5.1 Descrição de Formulários

5.1.1 Formulário “frmSplash.frm”

É a tela (formulário) de entrada da INTERFACE, contendo informações de elaboração, versão e restrições de uso. Com um click ou teclando-se qualquer tecla, o programa avança para a próxima tela (formulário “Form1.frm”).

A tela do formulário “frmSplash.frm” está ilustrada na Figura 5.2 a seguir.

Figura 5.2 - Tela de entrada da INTERFACE com o formulário "frmSplash.frm"

5.1.2 Formulário “Form1.frm” (INTERFACE: CE-QUAL-R1 & ACQUANET.

Parâmetros de Qualidade de Água para o CE-QUAL-R1: 1/2)

É a tela (formulário) contendo as informações do Sistema Produtor, Represa, Ponto de Amostragem, Horizonte de Simulação (em anos) e Modo de Cálculo (SIMULAÇÃO ou CALIBRAÇÃO).

A lista de represas contém apenas aquelas que estão na cabeceira da bacia hidrográfica do sistema escolhido⁴⁵. Porém, A INTERFACE foi concebida somente para a represa escolhida como estudo-de-caso, ou seja, a Represa Jaguari-Jacareí do Sistema Cantareira, podendo ser ajustada posteriormente para qualquer represa. Da mesma forma, a lista dos pontos de amostragem qualidade de água contém somente os dois pontos que estão localizados na represa Jaguari-Jacareí e que estão próximos das suas respectivas barragens, conforme orientado pelo Manual do CE-QUAL-R1.

No modo CALIBRAÇÃO, o usuário deverá escolher entre os pontos de amostragem disponíveis (JA-101 e JC-101) e em seguida, escolher uma das datas existentes na lista. Estas datas estão ligadas a dois *bancos de dados* (planilhas do MS-Excel) *de qualidade de água e quantidade de água da represa escolhida* (“REPRESA_JJ.xls”) e *de qualidade de água e quantidade de água de seus respectivos tributários, juntamente com os dados meteorológicos da represa* (“CQANJJQQ_resumo.xls”).

⁴⁵ O objetivo da dissertação não incluiu a simulação de todas as represas do sistema produtor, principalmente pela necessidade de simulação de qualidade de água em cursos d’água ou de estruturas hidráulicas que conectam uma represa a outra, não contemplada no presente trabalho.

Figura 5.3 -Tela de apresentação do formulário "Form1.frm" no modo CALIBRAÇÃO. No centro, fichas dos parâmetros de qualidade de água

Os números à direita da lista de datas (Figura 5.3) indicam a quantidade de valores disponíveis para os dados de temperatura da coluna d'água que foram determinadas para serem maiores ou iguais a dois. Ou seja, a lista contém no mínimo dados de temperatura da Superfície e Fundo da coluna d'água. Valores acima de três indicam que poderão existir valores medidos de metro em metro ou a cada dois metros ao longo da coluna, desde a superfície até o fundo.

Em CALIBRAÇÃO, após a escolha do ponto da amostra e da data amostra, o usuário deverá escolher qual o horizonte (em anos) a ser simulado, cujos valores aparecem na respectiva lista a partir do número um. Ou seja, o usuário poderá escolher apenas o próprio ano de simulação da amostra ou rodar uma seqüência de anos consecutivos a partir da data da amostra disponível de 1990 até o limite do ano 1999⁴⁶.

⁴⁶ Devido à restrição de tempo de desenvolvimento do presente trabalho, os dados de qualidade dos anos 2000 a 2003 da represa escolhida não puderam ser incorporados ao banco de dados da Interface.

Antes de iniciar a CALIBRAÇÃO, o usuário deverá escolher os valores das taxas/índices dos parâmetros de qualidade da água disponibilizados nas fichas da tela do formulário “Form1.frm” e na tela do formulário “Form2.frm”. Para calibrar os parâmetros físicos do CE-QUAL-R1, o usuário deverá *ajustar manualmente* (método de tentativa e erro) os parâmetros existentes na tela do formulário “Form3.frm”, descrito adiante, procedendo-se com diversas simulações até o melhor ajuste entre dados observados e dados simulados.

No modo SIMULAÇÃO, os parâmetros de calibração também estão disponíveis. Os demais itens do formulário ficam desabilitados, uma vez que os mesmos foram definidos em outros formulários, precedendo a simulação com as vazões fornecidas pelo modelo ACQUANET. São adicionadas algumas caixas de texto a fim de se informar ao usuário: mês/ano de início e de término da simulação escolhida, número de rodadas, número da rodada de início; a extensão em anos de cada rodada é mostrada no campo “horizonte em anos”. Nesta tela, o botão para acionamento da simulação é habilitado, pois as escolhas obrigatórias foram feitas em outros formulários, descritos adiante.

A Figura 5.4 a seguir ilustra o uso desse formulário no modo SIMULAÇÃO.

INTERFACE: CE-QUAL-R1 & ACQUANET. Parâmetros de Qualidade de Água para o CE-QUAL-R1: 1/2

Sistema: Cantareira | Represa: Jaguarí-Jacaré | Amostra (Ponto): JC-101 | Amostra (Data): 19/4/1995 43 | Horizonte: 3 Em Anos

Modo: **SIMULAÇÃO** | Tipo: Planejamento Tático | Data de Início: abr/90 | Data de Término: mar/94 | Rodada Inicial: 1 | Nº de Rodadas: 3

Macrófitas_1 | Macrófitas_2 | Macrófitas_3 | Detritos | Peixes | Decaimento_1 | Reaeração

Mat. Orgânica | Zooplâncton_1 | Algas_2 | Algas_3 | Algas_1 | **Zooplâncton_2**

2002

Coef. de Meia-Saturação sobre Algas e Detritos (mg/l)	1.6
Temperatura Crítica Inferior para Parada do Processo (°C)	2
Temperatura Ótima Inferior para o Processo (°C)	15
Temperatura Ótima Superior para o Processo (°C)	18
Temperatura Crítica Superior ou Letal (°C)	33
Fator de Multiplicação na Temperatura Crítica Inferior (0 a 0.98)	0.1
Fator de Multiplicação na Temperatura Crítica Superior (0 a 0.98)	0.1

Demais Parâmetros de Qualidade | Parâmetros de Calibração | Simulação com Arquivos do Acquanet | CE-QUAL-R1 (Simulação) ACQUANET | **SIMULAÇÃO COM ACQUANET** | Sair

Figura 5.4 - Tela de apresentação do formulário "Form1.frm" no modo 'SIMULAÇÃO'. No centro, fichas dos parâmetros de qualidade de água

As **fichas** disponíveis na tela do formulário “Form1.frm” incluem os valores dos parâmetros de qualidade de água desenvolvidos pela USACE para o CE-QUAL-R1, organizados na INTERFACE da seguinte forma:

Reaeração: é a escolha do Coeficiente de re-aeração com formulações disponíveis de O’Connor (1983) - OCONNOR e Kanwisher (1963) - KANWISH.

Matéria Orgânica: é a escolha das equivalentes estequiométricas entre matéria orgânica e: ortofosfato, nitrogênio e carbono.

Detritos: é a escolha dos valores referentes à velocidade de sedimentação e taxas de temperaturas limites para decomposição e multiplicação de detritos orgânicos.

Macrófitas_1: valores referentes às taxas de respiração, excreção, produção, mortalidade e; variação máxima de temperatura de macrófitas.

Macrófitas_2: valores de coeficiente de sombreamento, Coeficientes de Meia Saturação (HSC) para limitação de carbono inorgânico, nitrogênio e fósforo; profundidade máxima de crescimento de macrófitas; fração de nutrientes obtidos da coluna d'água.

Macrófitas_3: taxas máxima, mínima e crítica para fotossíntese e; fatores de multiplicação mínima e máxima para fotossíntese.

Zooplâncton_1: taxa máxima de ingestão e de mortalidade não predatória; eficiência de assimilação alimentar; fatores de preferência pelos compartimentos de algas e de detritos; taxa máxima de respiração.

Zooplâncton_2: HSC sobre algas e detritos; temperaturas críticas inferior, superior e ótima para o processo de alimentação; fatores de multiplicação.

Peixes: taxa de ingestão de alimento; fatores de preferência por bentos, pelos compartimentos de algas, pelo zooplâncton e por detritos; temperaturas críticas ótimas, inferior e superior para o processo de alimentação; fatores de multiplicação, taxas de respiração e mortalidade não-predatória; eficiência de alimentação.

Algas_1: coeficiente de sombreamento próprio devido à matéria orgânica particulada; fração de biomassa algal perdida para os detritos por mortalidade não-predatória; equivalente estequiométrica para sílica do 3º compartimento de algas.

Algas_2: taxa máxima de produção de fotossíntese; taxa de sedimentação fitoplanctônica; HSC para nitrogênio, gás carbônico e fósforo; intensidade de luz de saturação na máxima taxa de fotossíntese; taxa máxima de excreção; taxa máxima de mortalidade algal não-predatória; taxa máxima de respiração sem presença de luz. As informações servem para os três compartimentos de algas do CE-QUAL-R1 (campos Alg2, Alg3, Alg4) não sendo necessário o uso de todos os compartimentos. Os campos não utilizados deverão estar zerados.

Algas_3: HSC da sílica do 3º compartimento; temperatura mínima para o metabolismo algal; temperaturas mínima e máxima onde o processo ocorre com taxa máxima; temperatura máxima letal; taxas de multiplicação de temperatura referente à temperatura mínima do metabolismo e à temperatura máxima letal. As informações servem para os três compartimentos de algas do CE-QUAL-R1 (campos Alg6, Alg7, Alg8) não sendo necessário o uso de todos os compartimentos. Os campos não utilizados deverão estar zerados.

Decaimento_1: taxa de decomposição da *matéria orgânica dissolvida lábil*⁴⁷; taxa de decomposição da matéria orgânica refratária dissolvida; variação da passagem da matéria orgânica lábil para a matéria orgânica refratária; taxas de decaimento da amônia, detritos, coliformes e sedimento; taxa de desnitrificação (nitrito mais nitrato); temperatura inferior limite para decaimento da matéria orgânica, temperatura mais baixa para máxima taxa de decomposição; fator de multiplicação da temperatura inferior limite para decaimento da matéria orgânica.

⁴⁷ A matéria orgânica lábil refere-se à matéria orgânica proveniente da mortalidade e foto-respiração das algas que, em parte, é transformada em compostos recalcitrantes ou refratários (matéria orgânica refratária) cuja velocidade de decomposição é mais lenta e não envolve o consumo de oxigênio (Araújo Filho, 1991).

5.1.3 Formulário “Form2.frm” (Parâmetros de Qualidade de Água para o CE-QUAL-R1: 2/2)

É a tela da INTERFACE (Figura 5.5) que contém o restante dos coeficientes e taxas dos parâmetros de qualidade de água, devendo ser escolhidas antes de acionar a simulação do CE-QUAL-R1. O restante desses coeficientes/taxas é acessado pelo botão “Demais Parâmetros de Qualidade” na tela do formulário “Form1.frm” e está disponível da seguinte forma:

Decaimento_2: temperatura inferior limite para continuidade da nitrificação da amônia; temperatura mais baixa para taxa máxima de nitrificação; fator de multiplicação da temperatura inferior limite para continuidade da nitrificação da amônia; temperatura inferior limite para continuidade da denitrificação; temperatura mais baixa para taxa máxima de denitrificação; fator de multiplicação da temperatura inferior limite para continuidade da denitrificação.

Processos Anaeróbicos_1: concentração de OD que dispara os processos anaeróbicos; espessura do sedimento ativo para retirada dos materiais reduzidos; taxa de sedimentação das partículas oxidadas por manganês; taxa de redução de manganês oxidado; taxa de retirada de íon manganês do sedimento; taxa que íon manganês é oxidado; taxa de redução de SO_4^{-2} para S^{-2} na coluna d'água; taxa de retirada de S^{-2} do sedimento; taxa que S^{-2} é oxidado para SO_4^{-2} na coluna d'água; taxa que S^{-2} é perdido pela reação com Fe^{+2} ; taxa que PO_4^{-3} -P é retirado dos sedimentos, taxa que NH_4^{+} -N é retirado dos sedimentos.

Processos Anaeróbicos_2: taxa de sedimentação de ferro particulado (oxidado) Fe(III); taxa de redução para Fe(III); taxa de retirada de Fe^{+2} dos sedimentos; taxa de oxidação de Fe^{+2} à

Fe(III); taxa de oxidação de FeS dos sedimentos para Fe e S sob condições aeróbicas; taxa de sedimentação de FeS da coluna d'água; taxa de oxidação de FeS à Fe(III) e SO_4^{2-} sob condições aeróbicas na coluna d'água.

Processos Aeróbicos: número de gramas de O_2 necessários para oxidar 1g de NH_4^+ à NO_3^- ; equivalente estequiométrica para O_2 durante decomposição de detritos e sedimentos orgânicos; O_2 necessário para respiração biológica; equivalente estequiométrica para produção de O_2 na fotossíntese; equivalente estequiométrica para O_2 para decomposição da MO dissolvida; coeficiente de conversão de magnésio reduzido à oxi-hidróxido de magnésio; coeficiente de oxidação do ferro reduzido; coeficiente de oxidação do sulfito à sulfato.

Sólidos Suspensos: velocidade de sedimentação dos sólidos suspensos; coeficiente de adsorção de fósforo pela isoterma de Langmuir⁴⁸; coeficiente de adsorção de nitrogênio pela isoterma de Langmuir; quantidade máxima de amônia adsorvida; quantidade máxima de fósforo adsorvido.

Coliformes: o CE-QUAL-R1 é limitado a simular apenas um grupo de coliformes: fecais ou totais. O usuário deve então escolher entre um e outro para rodar a simulação.

Temperatura: fator de decaimento de coliformes em função da temperatura.

⁴⁸ Isotermas são equações matemáticas utilizadas para representar quantitativamente os mecanismos de adsorção e precipitação. Isoterma de Langmuir foi desenvolvida inicialmente para representar a adsorção de gases em sólidos (Gama, 2002).

Parâmetros de Qualidade de Água

Decaimento_2 Sólidos Suspensos Temperatura Proc. Anaeróbicos 1 Proc. Anaeróbicos_2 Coliformes Proc. Aeróbicos

ANAER1 e ANAER2

Conc. Oxigênio Dissolvido que Disparam os Processos Anaeróbicos (mg/l)	0.5
Espessura do Sedimento Ativo para retirada de Materiais Reduzidos ou Fosfatos (cm)	0.45
Tx. Sedimentação de Partículas Oxidadas por Mn (m/dia)	0.1
Tx. Redução de Mn(IV) em (1/dia) - de 0.002 a 0.16	0.008
Tx. de Retirada do Mn^{2+} dos Sedimentos ($g/m^2 \cdot dia$) - de 0.1 a 0.5	0.3
Tx. que Mn^{2+} é Oxidado a Mn(IV) em (1/dia)	0.35

ANAER4

Tx. de Redução de SO_4^{2-} à S^{2-} na coluna d'água (1/dia): >0.04	0.04
Tx. S^{2-} é Retirado dos Sedimentos ($g/m^2 \cdot dia$): > 0.1	0.1
Tx. S^{2-} é Oxidado à SO_4^{2-} na coluna d'água (1/dia): >0.5	0.5
Tx. S^{2-} é Perdido pela Reação com Fe^{2+} (1/dia): >0.05	0.05
Tx. $PO_4^{3-} - P$ é Retirado dos Sedimentos ($g/m^2 \cdot dia$): >0.3	0.3
Tx. $NH_4^+ - N$ é Retirado dos Sedimentos ($g/m^2 \cdot dia$): >0.4	0.4

Confirma

Figura 5.5 - Tela de apresentação do formulário "Form2.frm" para escolha dos parâmetros de qualidade de água

5.1.4 Formulário "Form3.frm" (INTERFACE CE-QUAL-R1 & ACQUANET:

Calibração)

É a tela da INTERFACE (Figura 5.6) que contém os parâmetros físicos de CALIBRAÇÃO do CE-QUAL-R1 cujos campos são:

Fração da área da superfície da água exposta à ação do vento; fração de convecção penetrativa do vento; coeficiente de difusão devido à ação do vento; coeficiente de difusão devido à advecção; densidade crítica para alocação das águas de influxo; coeficiente de atenuação de radiação solar devido à dispersão e absorção; coeficientes empíricos na função de vento para fluxos de evaporação e fluxo de calor convectivo (AA e BB); coeficiente de extinção de luz; fração de radiação solar absorvida em 0,60 m de profundidade; HSC para sólidos em suspensão.

INTERFACE CE-QUAL-R1 & ACQUANET: Calibração

Parâmetros Físicos de Calibração do CE-QUAL-R1

Section	Parameter	Value
MIXING	Fração da Área da Superfície da Água Exposta à Ação do Vento (0.0 a 1.0)	1.0
	Fração de Convecção Penetrativa do Vento. Recomendado 0.3 e em Laboratório obteve-se 0.1 a 0.5 (0.0 a 1.0)	0.3
	Coefficiente de Difusão Devido ao Vento. Recomendado Valores entre 1.0E-05 e 1.0E-04	1.0-05
	Coefficiente de Difusão Devido à Advecção. Recomendado Valores entre 1.0E-06 e 1.0E-05	1.0-06
	Densidade Crítica Para Alocar as Águas de Influxo (kg/m³). Recomendado 0.1 (0.01 a 2.00)	0.1
LIGHT	Coefficiente de Extinção de Luz. Faixas de Valores: 0.03 a 1.00 de ultra-oligo a oligotrófico; 0.10 a 2.00 para mesotrófico; de 0.50 a 4.00 para eutrofico e 1.00 a 4.00 para distrófico (1/m) [nw]	0.3
	Fração de Radiação Solar Absorvida em 0,6m de Profundidade (0.0 a 1.0) [Beta]	0.3
	Coefficiente de Meia-Saturação para Sólidos em Suspensão (1/m³mg/l)	0.01
PHYS1	Coefficiente de Atenuação de Radiação Solar devido à Dispersão e Absorção TURB (0.0 a 0.13; Recomendado 0.06)	0.8
	Coefficiente Empírico na Função de Vento para Fluxos de Evaporação e Fluxo de Calor Convectivo (AA) em m/mb-sec	2.83-09
	Coefficiente Empírico na Função de Vento para Fluxos de Evaporação e Fluxo de Calor Convectivo (BB) em 1/mb	2.50-10

Confirma

Figura 5.6 - Tela de apresentação do formulário "Form3.frm" onde estão os parâmetros físicos de calibração do CE-QUAL-R1

Em síntese, as fichas constantes nos formulários Form1.frm, Form2.frm e o Form3.frm abrangem a calibração dos parâmetros físicos, químicos e biológicos existentes no modelo CE-QUAL-R1.

5.1.5 Formulário "Form4.frm" (INTERFACE: CE-QUAL-R1 & ACQUANET - ARQUIVOS do ACQUANET para SIMULAÇÃO do CE-QUAL-R1)

Existem duas formas de se utilizar este formulário: a primeira é escolher o cenário do ACQUANET que será simulado pelo CE-QUAL-R1; a segunda é utilizá-lo na escolha do arquivo resultado do CE-QUAL-R1 para conversão dos valores em texto gerados pelo modelo para a forma de banco de dados da forma MS-Access (*.mdb).

5.1.5.1 Primeira forma

O formulário contém os seguintes campos: drive de localização do cenário e pasta de localização do cenário e lista de cenários existentes. O usuário, ao escolher o cenário, poderá apenas visualizar suas características principais com um duplo click no nome do cenário ou acionando o botão “Visualiza Arquivo” e, posteriormente, carregá-lo para a próxima tela.

As principais características visualizadas nesta tela são: tipo de simulação do ACQUANET (Simulação Contínua ou Planejamento Tático), ano inicial da simulação, mês inicial da simulação, número de anos da série simulada, horizonte da simulação em número de anos, sistema produtor, represa simulada, volume total inicial da represa, volume operacional inicial da represa, nível d’água inicial da represa em relação ao nível do mar, elevação inicial do nível d’água em relação ao fundo da represa, existência ou não de tomada seletiva e valor de restrição de operação da tomada seletiva.

O próximo passo é acionar o botão “Carrega Arquivo” que aciona a tela do formulário Form6.frm (Figura 5.7).

Figura 5.7- Tela de apresentação do formulário "Form4.frm" com opção de escolha de cenários

5.1.5.2 Segunda forma

A escolha da pasta onde se localiza o arquivo de saída do CE-QUAL-R1, o formulário fica reduzido apenas à escolha de Drive e lista de pastas onde o usuário deverá escolher o local em que está o arquivo de saída ("CQR.OTP") de resultados do CE-QUAL-R1.

Nesta opção estão habilitados os botões de retorno para simulação, saída do programa ou conversão dos dados de saída em um banco de dados MS-Access. Selecionando-se este botão, o usuário deverá escolher o nome do arquivo onde os dados serão salvos pela INTERFACE e onde posteriormente poderão ser manipulados graficamente ou estatisticamente conforme demanda. Esta opção serve tanto para o modo SIMULAÇÃO como CALIBRAÇÃO.

A Figura 5.8 seguinte ilustra a descrição desta opção de uso do formulário.

Figura 5.8 - Tela de apresentação do formulário "Form4.frm" com a opção de escolha de resultados

5.1.6 Formulário “Form6.frm” (INTERFACE CE-QUAL-R1 & ACQUANET: Escolha de Vazões nas Tomadas, Descargas de Fundo e Vertedores)

Preparada para simulações da Represa Jaguari-Jacareí, esta tela da INTERFACE (Figura 5.9) tornou-se objetivo principal do presente trabalho *onde podem ser escolhidas as vazões na tomada seletiva* existente na estrutura de retirada da represa (emboque do Túnel 7 usado na transferência da Represa Jaguari-Jacareí para a Represa Cachoeira), as vazões nos vertedores existentes na estrutura da barragem Jaguari e as vazões nas válvulas difusoras (descargas de fundo) existentes nas barragens do rio Jaguari e rio Jacareí e assim avaliar o impacto da escolha nas variáveis de qualidade de água.

Com base na restrição hidráulica do formulário “Form4.frm” e com base nos níveis d’água inicial e final de cada mês, as células para escolha das vazões são então habilitadas para o usuário, aparecendo na cor amarela permitindo-se a digitação direta do valor da vazão ou são desabilitadas aparecendo na cor cinza. As células estão preparadas para verificar se o usuário escolheu vazão superior à aquela obtida como *vazão ótima* na simulação do cenário no ACQUANET, cujos valores aparecem nas células de cor azul.

Podendo ser escolhido cenário com muitos meses de simulação, foi facilitado ao usuário um click no campo “Escolha Automática de Vazões”, que obedecendo também à restrição hidráulica de operação e níveis d’água, preenche com valores iguais em cada mês os valores de vazão nas células em amarelo. Mesmo com essa escolha, o usuário poderá apagar quantas vazões desejar e preencher com o valor desejado ou poderá apagar todas as vazões, escolhidas manual e/ou automaticamente, clicando no botão “Apagar Vazões”.

O usuário ainda pode escolher a opção “Fundo” para que as vazões na tomada seletiva sejam retiradas somente pelas comportas de fundo.

Unidade de Vazão: m³/s

Escolha Automática de Vazões: ☒ **Fundo:** ☐ **Apagar Vazões**

Vazões de Jusante
☒ Iguais para Jusante
☐ Descarga de Fundo Máxima 36.00

Escolha as Vazões na Tomada Seletiva								Escolha Vazões		
M/Ano/Rod	Vazão T.7	Tomada 6	Tomada 5	Tomada 4	Tomada 3	Tomada 2	Tomada 1	Qdes+Qver	Qdes(Ja+Jc)	Qver(Ja+Jc)
jan/90/r1	0.20			0.10	0.10			2.00	2.00	
fev/90/r1	12.96	6.48	6.48					2.00	2.00	
mar/90/r1	19.30	9.65	9.65					2.00	2.00	
abr/90/r1	27.22	13.61	13.61					2.00	2.00	
mai/90/r1	26.32	13.16	13.16					2.00	2.00	
jun/90/r1	24.67			12.34	12.34			2.00	2.00	
jul/90/r1	23.83			11.92	11.92			2.00	2.00	
ago/90/r1	24.12			12.06	12.06			2.00	2.00	
set/90/r1	27.22			13.61	13.61			2.00	2.00	
out/90/r1	26.34			13.17	13.17			2.00	2.00	
nov/90/r1	27.22			13.61	13.61			2.00	2.00	
dez/90/r1	17.38			8.69	8.69			2.00	2.00	
jan/91/r1	16.34			8.17	8.17			2.00	2.00	
fev/91/r1	15.40			7.70	7.70			2.00	2.00	
mar/91/r1	13.58			6.79	6.79			2.00	2.00	
abr/91/r1	10.92	5.46	5.46					2.00	2.00	
mai/91/r1	10.71	5.36	5.36					2.00	2.00	
jun/91/r1	20.70	10.35	10.35					2.00	2.00	
jul/91/r1	20.37	10.19	10.19					2.00	2.00	
ago/91/r1	22.97	11.49	11.49					2.00	2.00	
set/91/r1	27.22	13.61	13.61					2.00	2.00	
out/91/r1	26.34	13.17	13.17					2.00	2.00	
nov/91/r1	27.22	13.61	13.61					2.00	2.00	

Iniciar Simulação em 1 **Nº da Rodada**
Horizonte de Simulação 8 **Em Nº de Rodadas**

Escolha de Parâmetros Iniciais de Qualidade **Retorna** **Sair**

Figura 5.9 - Tela de apresentação do formulário "Form6.frm" com a opção de escolha de vazões na tomada seletiva para um cenário do ACQUANET do tipo Planejamento Tático

Com relação às vazões de jusante, ou seja, aquelas vazões não utilizadas para abastecimento da RMSP, o usuário poderá liberá-las tanto pela descarga de fundo ou pelo vertedor se houver

nível d'água suficiente no início e final do respectivo mês. Ao clicar no campo “Descarga de Fundo Mínima”, o usuário poderá definir um valor que será adotado para a descarga de fundo, sendo o restante liberado pelo vertedor. Se apagar as vazões adotadas e clicar em “Vazões Iguais para Jusante”, ao clicar em “Escolha Automática de Vazões”, a INTERFACE distribui por igual, entre descarga de fundo e vertedor, a vazão disponível, respeitando sempre os níveis d'água de início e fim de cada mês. Ou seja, ao ser carregado, o formulário habilitará a coluna de vertedor com a cor amarela comente de houver nível d'água suficiente para ser vertido pela comporta do vertedor.

O usuário não tem meios de alterar na INTERFACE as vazões ótimas resultantes do ACQUANET. Portanto, os valores obtidos pelo ACQUANET serão inteiramente utilizados nas simulações do CE-QUAL-R1 (células azuis ilustradas na Figura 5.8).

De forma diferente do ACQUANET, foi facilitada ao usuário da INTERFACE a escolha do mês inicial e ano final da simulação, no caso de cenário de Simulação Contínua, ou a rodada inicial e final no caso de cenário de Planejamento Tático. O próximo passo então é proceder a estas duas escolhas que habilitarão o botão de “Escolha de Parâmetros Iniciais de Qualidade” que, ao ser acionado, levará o usuário à tela do formulário Form8.frm.

5.1.7 Formulário “Form8.frm” (Parâmetros de Qualidade de Água: PERFIL INICIAL da REPRESA)

Usado somente no modo SIMULAÇÃO, é a tela da INTERFACE (Figura 5.10) que o usuário deve preencher os parâmetros de qualidade do perfil inicial (perfil de partida) da represa que será simulada. O perfil inicial de qualidade da represa será usado somente uma vez se o

cenário a ser simulado do ACQUANET for do tipo Simulação Contínua e será usado todo início de uma rodada em caso de cenário de Planejamento Tático.

Ao ser chamado pelo formulário Form6.frm, este poderá ser usado clicando em um dos dois botões existentes: Botão 1.“Escolha Manual / Semi-Automática de Parâmetros” ou Botão 2.“Escolha Automática de Parâmetros”.

Ao ser clicado, o Botão 1 (um) habilita ao usuário uma “caixa” com as opções de pontos disponíveis, para este trabalho, contendo apenas os pontos JA-101 e JC-101 da Represa Jaguari-Jacareí. Ao escolher entre um dos pontos, serão então habilitadas as opções de “Superfície”, “Superfície e Fundo” ou “Superfície, Meio e Fundo”.⁴⁹

Clicando-se em uma das opções, é habilitada ao usuário a tela do formulário Form9.frm (Perfil Inicial de Qualidade da Represa), que também habilita a escolha entre superfície, superfície e fundo ou superfície, meio e fundo. Esta nova tela conecta-se a uma nova planilha do MS-Excel denominada “RepMes.xls” (banco de dados), cujos valores dos parâmetros de qualidade de água estão calculados na forma de média da série de dados de superfície, meio e fundo da coluna d’água para o ponto de amostragem (JA-101 ou JC-101) escolhido pelo usuário.

⁴⁹ Posteriormente, poderá ser habilitado o uso de diversas camadas, a cada metro ou em intervalo desejado, não sendo possível introduzir essa opção no presente trabalho. Além disso, quanto maior o número de camadas, maior é o volume de dados que deve ser fornecido pelo usuário.

Parâmetros de Qualidade de Água: PERFIL INICIAL da REPRESA

Escolha Manual de Parâmetros do Perfil Inicial

☐ Superfície
☐ Superfície e Fundo
☒ Superfície, Meio e Fundo

Especificar Número de Camadas

Pontos Disponíveis: JC-101

CAMADA DE SUPERFÍCIE

0	0.001	0	0.001	0.002	5.53333	0.03	0.002	20
0.0002	2.4	7.56666	0.02	101.0	20.06	49.0	0.001	6.6
6	0.6	0	6.7	0	0	4.0	0	600
12000	0	200	400	1000	1			

CAMADA DE MEIO

16.49	0.001	0	0.001	0.002	2.33333	0.036	0.002	30
0.0002	2.4	5.73333	0.03	101.0	18.1666	49.0	0.001	6.7
6	0.5	0	5.5	0	0	4.0	0	600
12000	0	200	400	1000	1			

CAMADA DE FUNDO

32.98	0.001	0	0.001	0.002	2.66666	0.046	0.002	40
0.0002	2.4	6.6	0.025	101.0	17.84	49.0	0.001	6.8
6	0.4	0	6	0	0	4.0	0	600
12000	0	200	400	1000	1			

☒ Superfície
☒ Meio
☒ Fundo

Atualização

Altera Mês de Referência: set

<< Cancela Escolha
 >> Confirma Escolha

Avançar para Simulação do CE-QUAL-R1
 Sair

Escolha Man./S.Aut. Parâmetros
 Escolha Automática de Parâmetros
 Retorna para Escolha Novas Tomadas

Figura 5.10 - Tela de apresentação dos formulários “Form8.frm” e “Form9.frm” com escolha manual / semi-automática do perfil inicial da represa a ser simulada pelo CE-QUAL-R1

Automaticamente os valores médios do ponto escolhido são inseridos nas caixas de texto da tela e que serão usadas pelo modelo CE-QUAL-R1. O mês em referência, escolhido primeiramente pela INTERFACE, é o mesmo escolhido para início do cenário do tipo Planejamento Tático, fornecido pelo arquivo do ACQUANET, ou do tipo Simulação Contínua escolhido pelo usuário na tela do formulário Form6.frm. Este mês, entretanto, poderá ser alterado por escolha do usuário na respectiva lista de opção, antes de se avançar, o que altera automaticamente os valores da tela. Como nem todos os dados, necessários para o perfil de partida, existem no banco de dados dos pontos da represa de estudo, alguns foram deixados “pré-inseridos” para facilitar o uso. Devido ao espaço limitado da tela, o significado de cada parâmetro de qualidade aparece quando o usuário move o cursor sobre cada uma delas. Com exceção da profundidade do nível d’água, automaticamente calculada, conforme o mês de início da simulação, os demais parâmetros de qualidade, inseridos automaticamente pela INTERFACE, podem ser alterados pelo usuário antes de se avançar para a SIMULAÇÃO.

Feita a escolha dos valores iniciais, o usuário clica em “Confirma Escolha” e então os valores ficam travados para serem usados pelo CE-QUAL-R1.

O Botão 2 de escolha automática de parâmetros, habilita uma pequena tela (Figura 5.11) contendo a opção de ponto de amostragem habilitado para a represa de estudo (pontos JA-101 e JC-101 no caso da Represa Jaguari-Jacareí) e, ao ser clicado, aciona o procedimento da lista de datas que funciona da seguinte forma: com base no ponto escolhido e no mês de início da SIMULAÇÃO de qualquer tipo de cenário do arquivo do ACQUANET, a INTERFACE procura no banco de dados da planilha REPRESA_JJ.xls os dias cujo mês seja o mesmo que o mês escolhido, independente do ano. As datas que aparecem na lista são as mesmas que podem ser usadas pelo usuário no modo de CALIBRAÇÃO. Faz-se então a escolha por uma das datas da lista e que será usada pelo CE-QUAL-R1, agora para a forma SIMULAÇÃO, sem o usuário precisar escolher qualquer parâmetro de qualidade. Como o banco de dados não possui todos os parâmetros possíveis de serem simulados pelo modelo, alguns valores foram escolhidos com base na literatura do manual do modelo.

Figura 5.11 - Tela de apresentação do Formulário Form8.frm com a opção de escolha automática do perfil inicial da represa a ser simulada pelo CE-QUAL-R1

O próximo passo é clicar no botão “Avança Para a Simulação do CE-QUAL-R1” que abre a tela do formulário “Form1.frm”, um dos principais formulários da INTERFACE, pois aciona os principais módulos existentes. Agora, no modo de SIMULAÇÃO, a tela do “Form1.frm” ganha novas caixas (ver Figura 5.3), comunicando-se com parte das informações do cenário do ACQUANET que será simulado, a saber: tipo de simulação do ACQUANET (Planejamento Tático ou Simulação Contínua), data de início (mês/ano) e data de termino (mês/ano) previamente definidas pelo usuário, rodada inicial e número de rodadas, definidas previamente pelo usuário; exceção será feita ao número de rodadas, definido como zero se o cenário for de Simulação Contínua, possuindo apenas uma rodada. Nesse modo de SIMULAÇÃO, no “Form1.frm”, é permitido ao usuário apenas acionar o CE-QUAL-R1.

Acionando-se o botão “CE-QUAL-R1 (Simulação) ACQUANET” ou “CE-QUAL-R1 (Calibração)”, o código da INTERFACE ativa os **módulos** existentes procedendo às diversas rodadas do modelo.

5.1.8 Formulário “frmGraph.frm” (INTERFACE do CE-QUAL-R1 & ACQUANET: Visualização de Resultados Do Banco de Dados)

Este formulário permite ao usuário escolher um ou mais resultados, anteriormente transformados da extensão texto para a extensão banco de dados, e plotar os resultados em um gráfico de pontos XY.

Este formulário propicia a visualização de dados tanto dos cenários do modo CALIBRAÇÃO, como SIMULAÇÃO (Simulação Contínua ou Planejamento Tático). Existem duas formas de utilizar este formulário, conforme descrição a seguir:

5.1.8.1 Visualização de um Único Cenário Simulado (Calibração)

Nesta forma (Figura 5.12), o usuário escolhe apenas um único cenário para visualização de resultados. Após a escolha, adicionando o cenário à lista de cenários, o usuário procede à escolha do dia e mês do ano do cenário simulado que deseja visualizar acrescentando-o, agora na forma de calendário Juliano⁵⁰, a uma nova lista. Clicando-se no botão “abrir banco de dados”, os dias selecionados na lista de datas serão trazidos para a tela do gráfico. Desta forma, o usuário poderá ver ao mesmo tempo os resultados de diversos dias do ano. O usuário poderá limpar a lista, selecionar novas datas e plotar outros resultados conforme a demanda.

Com um único cenário selecionado, também é permitido ao usuário plotar no gráfico as datas constantes no banco de dados de *valores observados* juntamente com os *valores simulados* pelo CE-QUAL-R1 (**procedimento de CALIBRAÇÃO**), conforme Figura 5.12 a seguir:

Figura 5.12 - Tela de apresentação do formulário “frmGraph.frm” com exemplo de valores observados x valores simulados

⁵⁰ O dia/mês/ano do calendário Gregoriano corresponde ao número de dias (1 a 365) do dia Juliano refere-se. Exemplo: o dia Gregoriano 01/03/2003 corresponde ao dia Juliano 60.

5.1.8.2 Visualização de Diversos Cenários Simulados (Simulação)

Nesta forma (Figura 5.13), o usuário procede à escolha de diversos cenários, clicando-se na lista de escolha de cenários e adicionando-os à respectiva lista de “Cenários Escolhidos”. Nesta opção, uma caixa de texto estará habilitada para uso e poderá conter um dia qualquer do ano. Ao clicar no botão “abrir banco de dados”, o programa estabelece a conexão com o banco de dados (*.mdb) exatamente no dia e mês do cenário escolhido pelo usuário. O usuário poderá avançar com as setas indicativas do início ao fim do arquivo simulado, ou seja, do início ao final de um ano, visualizando quaisquer dias do cenário, conforme Figura 5.13.

Figura 5.13 - Tela de apresentação do formulário “frmGraph.frm” com resultados (três arquivos simultâneos) armazenados no banco de dados para o modo Simulação

5.1.9 Formulário “frmGraph.frm” (INTERFACE do CE-QUAL-R1 & ACQUANET: CURVA DE PERMANÊNCIA DE RESULTADOS SIMULADOS)

Nesta tela da INTERFACE (Figura 5.14) podem ser visualizados os *resultados diários simulados* pelo CE-QUAL-R1 previamente selecionados pelo usuário no formulário “frmGraph.frm”, indicado principalmente para os cenários de Planejamento Tático do modelo ACQUANET, onde os valores são agrupados na forma de valores médios e em uma curva de permanência (ou de probabilidade) de valores. Este formulário permite a visualização de qualquer variável simulada pelo CE-QUAL-R1, sendo necessária a sua escolha prévia no formulário “frmGraph.frm”.

Nessa curva de permanência, os valores resultantes de uma simulação são dispostos de maneira decrescente formando um conjunto ordenado de valores. A ordem (ou probabilidade de ocorrência) dos resultados nesse conjunto é representada (em porcentagem) dividindo-se sua respectiva posição (m) pelo número total de valores existentes (N), acrescidos em um (N+1) o representa uma incerteza, conforme a formulação seguinte:

$$P(x \leq X) = \left(\frac{m}{N+1} \right), \quad m = 1 \dots N \quad (5.1)$$

onde: N = número total de valores simulados agrupados em um conjunto

m = número de ordem do valor procurado no conjunto

x = valor procurado existente no conjunto

X = maior valor existente no conjunto

P (x ≤ X) = probabilidade do resultado simulado x ser menor ou igual a X

Para cada valor de P(x ≤ X) existe um valor x associado no conjunto de valores ordenados.

O usuário, ao “chamar” este formulário no botão “Curva de Permanência” do formulário “frmGraph.frm”, deverá escolher um agrupamento em metros de como deverão ser calculados os valores na tabela. Acionando o botão “Calcula” após a escolha da profundidade de agrupamento, a INTERFACE procederá ao cálculo dos valores médios resultantes, agrupados na profundidade escolhida, isto é, caso seja escolhida o valor padrão 1.00m, a INTERFACE fará a média dos valores da variável escolhida a cada intervalo de 1.00m em 1.00m. A tabela tem início no primeiro dia do mês inicial da simulação estendendo-se até o último dia do mês da simulação, conforme Figura 5.14 a seguir:

INTERFACE CE-QUAL-R1 & ACQUANET: CURVA DE PERMANÊNCIA DE RESULTADOS SIMULADOS

Dia x Prof.	0 m	-1 m	-2 m	-3 m	-4 m	-5 m	-6 m	-7 m	-8 m	-9 m	-10 m	-11 m
01/set/a1	21.25	21.025	20.875	19.7	19.7	19.7	19.7	19.5	19.5	19.2	18.725	18.725
02/set/a1	21.9	21.9	21.75	19.725	19.725	19.725	19.725	19.5	19.5	19.2	18.675	18.675
03/set/a1	22.6	22.3	21.8	19.75	19.75	19.75	19.725	19.5	19.5	19.2	18.725	18.625
04/set/a1	23.1	22.9	21.85	19.75	19.75	19.75	19.75	19.5	19.5	19.2	18.725	18.725
05/set/a1	23.675	23.4	22.075	19.775	19.75	19.75	19.75	19.525	19.5	19.2	18.625	18.625
06/set/a1	23.65	23.45	22.175	19.775	19.75	19.75	19.75	19.525	19.425	19.025	18.675	18.675
07/set/a1	23.525	23.225	22.175	19.775	19.75	19.75	19.75	19.475	19.375	18.875	18.725	8.4125
08/set/a1	23.125	22.85	21.975	19.875	19.85	19.85	19.8	19.525	19.375	8.7875	18.725	18.3
09/set/a1	23.075	22.95	21.675	19.975	19.9	19.9	19.9	19.5	8.8625	18.775	18.75	18.35
10/set/a1	23.625	23.475	21.875	19.975	19.975	19.9	19.825	18.975	18.975	18.775	18.75	18.375
11/set/a1	24.05	23.9	22.025	19.975	19.975	19.95	19.875	1.99688	18.95	18.775	18.75	18.35
12/set/a1	24.7	24.4	22.075	20.025	20.025	19.95	1.52813	19.125	19	18.775	18.75	18.325
13/set/a1	24.675	24.475	22.375	20.025	20.025	19.95	1.47813	19.175	19.025	18.775	18.675	18.35
14/set/a1	24.575	24.5	22.325	20.05	20.025	20	9.5125	19.2	19.025	18.775	18.625	18.375
15/set/a1	24.7	24.375	22.575	20.05	20.025	20.05	19.425	19.125	18.95	18.725	18.675	18.475
16/set/a1	24.3	24.225	22.8	20.1	0.0375	0.0375	19.45	19.05	18.825	18.725	18.725	18.525
17/set/a1	24.15	24.125	22.55	20.05	20.025	1.89687	19.225	19.025	18.9	18.825	18.825	18.625
18/set/a1	24.575	24.425	22.625	20.05	1.03125	9.8125	19.125	19.075	19	18.85	18.85	18.65
19/set/a1	25.475	25.15	22.95	20.025	1.10313	19.675	19.2	19.2	19.1	18.9	18.875	18.475
20/set/a1	26.2	25.95	23.125	0.1875	9.9875	19.7	19.175	19.175	19.1	18.9	18.675	18.525
21/set/a1	26.7	26.475	23.225	20.2	1.03125	19.7	19.175	19.175	19.025	19	18.725	18.525
22/set/a1	27.425	27.1	23.225	20.15	20.025	19.725	19.2	19.2	9.0375	19	18.725	18.55
23/set/a1	28.05	27.825	23.225	20.175	19.975	19.7	19.275	19.175	19.025	19	18.75	18.6
24/set/a1	28.25	28.175	23.075	1.17812	19.975	19.75	19.3	19.225	19.025	19	18.775	18.625
25/set/a1	27.65	27.65	22.625	1.20625	20.1	19.875	19.475	9.2625	19.1	19.075	18.775	18.625
26/set/a1	26.45	26.45	22.45	1.20625	20.1	19.825	9.4375	19.225	19.175	19.15	18.8	18.675
27/set/a1	25.525	25.525	22.375	0.2875	20.075	19.85	9.2625	19.325	19.075	19.05	19	18.725
28/set/a1	24.825	24.825	21.45	0.2625	20.275	20.1	1.31875	19.45	19.075	19.075	18.775	18.1
29/set/a1	24.95	24.85	22.2	1.45625	20.4	20.25	19.35	19.55	19.15	9.0875	18.9	18.1
30/set/a1	25.55	25.475	21.35	0.5125	20.4	9.7875	9.6125	19.525	19.15	19.075	19.075	18.1
01/out/a1	25.925	25.875	21.35	0.5375	20.425	1.63125	19.525	19.475	19.225	19.175	19.15	18.85

Profundidade Agrupada a Cada: **1.00 (m)**

Nível: ☒ Diário ☐ Mensal

Calcula

Gráf./Tab.: ☒ Tabela

Arquivos em Leitura

- PT_ROD_0_90.mdb
- PT_ROD_0_91.mdb
- PT_ROD_0_92.mdb
- PT_ROD_1_91.mdb
- PT_ROD_1_92.mdb
- PT_ROD_1_93.mdb
- PT_ROD_2_92.mdb
- PT_ROD_2_93.mdb
- PT_ROD_2_94.mdb

Parâmetro em tela: **Temp(°C)**

Limpa Retorna Sair

Figura 5.14 - Tela de apresentação do formulário "frmPer.frm" - valores médios agrupados na profundidade escolhida

Simultaneamente, com base nos valores médios diários calculados de cada mês, a INTERFACE procede ao cálculo da curva de permanência dos valores mensais, ordenando os valores diários a partir dos menores valores (100 %) até os valores maiores (0 %).

O valor padrão de cálculo da curva de permanência é de 70 % podendo ser alterado a qualquer momento pelo usuário que ao teclar “Enter” ou o botão “Atualiza”, tem os valores recalculados para a porcentagem escolhida. O mesmo poderá ser visualizado graficamente, clicando primeiramente no botão de opção “Mensal”, onde é alternado da tabela de valores médios diários para a tabela de valores mensais (curva de permanência), e em seguida clicando na opção “Gráfico” (Figura 5.15).

Figura 5.15 - Tela do formulário "frmPer.frm" com a tabela mensal dos valores ordenados como Curva de Permanência dos cenários do ACQUANET simulados pelo CE-QUAL-R1

A opção de “Gráfico” permite a visualização de apenas um único gráfico mensal. O avanço para os meses seguintes ou retrocesso é feito na caixa de opções existente na tela. Fica habilitado ao usuário alterar o valor da porcentagem da curva de permanência sendo a mesma atualizada no botão “Atualiza” ou teclando-se “Enter”. Tal aplicação pode ser visualizada na Figura 5.16 a seguir:

Figura 5.16 - Tela do formulário "frmPer.frm" - visualização do gráfico de resultados das simulações dos cenários do ACQUANET pelo CE-QUAL-R1 - "Curva de Permanência"

5.2 Descrição de Módulos

Os módulos desenvolvidos na INTERFACE, como em qualquer programa desenvolvido em MS – Visual Basic 6, não podem ser visualizados pelo usuário mas, como os formulários, executam cálculos e outros procedimentos internos que demonstram o funcionamento da INTERFACE, a seguir descritos:

5.2.1 Módulo “modMontarCQRdat2.bas”

Chamado tanto na forma de CALIBRAÇÃO como SIMULAÇÃO, este módulo é responsável pela montagem do arquivo de entrada (CQR.DAT) para uso do CE-QUAL-R1, que pode ultrapassar 2.400 linhas, o que já representa uma das vantagens de desenvolvimento da

INTERFACE. Por estar dentro de um módulo, este montará um novo arquivo de entrada a cada chamada de uma simulação. Este módulo será usado ao menos uma vez, pois corresponde a uma rodada efetuada pelo CE-QUAL-R1. Se houverem outras rodadas, conforme horizonte definido pelo usuário ou cenário do ACQUANET, o módulo será chamado para montar outros arquivos de entrada. Dentro deste módulo existe uma chamada de um procedimento de interpolação de dados, descrito a seguir.

5.2.2 Módulo “modInterpola.bas”

O maior número de dados existentes em uma determinada data de amostra escolhida pelo usuário no formulário Form.1.frm refere-se aos valores de temperatura e/ou oxigênio dissolvido medidos no ponto da represa de estudo, podendo ocorrer de metro em metro. Os demais parâmetros aparecem em menor quantidade, sendo alguns deles medidos a cada dois metros, superfície-meio-fundo, superfície-fundo ou somente na superfície. O perfil inicial ou de partida dos parâmetros de qualidade da represa depende desta quantidade de valores para que seja determinado o número de camadas iniciais e onde, em cada camada, são inseridos os 32 parâmetros de qualidade e elevação correspondente. Portanto, cada camada terá como espessura o valor da divisão da elevação do nível d'água pelo número de valores de temperatura.

Este módulo faz com que os parâmetros, cuja quantidade de dados é menor que os de temperatura, sejam interpolados com a quantidade de dados de temperatura determinando-os conforme a camada correspondente. Em outras palavras, se, por exemplo, houver 15 valores de temperatura para uma data e 3 valores para pH, o módulo interpolará os valores de pH

recalculando-os para 15 valores e que serão usados para montar as 15 camadas do perfil inicial da represa de estudo.

Este procedimento é chamado pelo módulo “modMontarCQRdat2.bas” no momento em que estiver sendo montado o perfil inicial da represa, tanto na forma CALIBRAÇÃO como para SIMULAÇÃO se esta estiver usando uma data como referência, conforme descrito nos formulários “Form8.frm” e “Form9.frm” (botão de “Escolha Automática de Parâmetros”).

5.2.3 Módulo “modLerRepresas.bas”

Este módulo poderá ser chamado tanto pelo formulário “Form1.frm” como pelos formulários “Form9.frm” e “frmGraph.frm”.

No primeiro caso, o módulo fará a leitura do banco de dados da represa de estudo (arquivo REPRESA_JJ.xls) carregando a INTERFACE com os valores dos seguintes parâmetros de qualidade de água existentes: temperatura, nitrogênio amoniacal, fosfato solúvel, pH, coliformes fecais ou totais, oxigênio dissolvido, nitrogênio nitrito, nitrogênio nitrato, manganês particulado, manganês solúvel, ferro particulado e ferro solúvel, sendo esses os parâmetros atualmente disponíveis para a represa de estudo. Os valores então serão interpolados, conforme descrito no módulo “modInterpola.bas” para serem usados no perfil inicial da represa de estudo.

Se a opção de “Escolha Manual / Semi-Automática” for feita pelo usuário no formulário “Form8.frm”, este chamará o formulário “Form9.frm” e o módulo “modLerRepresas.bas” fará a conexão com o arquivo “RepMes.xls” procedendo a leitura dos valores médios da série

histórica de qualidade, calculados para cada mês do ano para os níveis d'água de superfície, meio e fundo para um dos pontos disponíveis (JA-101 ou JC-101) a serem escolhidos. O ponto selecionado pelo usuário será usado pela INTERFACE que preencherá as caixas de texto do formulário Form9.frm, visualizada juntamente com a tela do Form8.frm para o perfil inicial da represa.

5.2.4 Módulo “modLerTributarios.bas”

Sendo chamado pelo módulo “modMontarCQRdat2.bas”, este módulo faz a conexão com o banco de dados meteorológicos e os dados de quantidade e qualidade dos tributários (“CQANJJQQ_resumo.xls”), formadores da represa de estudo.

5.2.5 Módulo “modLerCQROTP.bas”

Este módulo é usado após cada rodada do CE-QUAL-R1. O programa procede à leitura dos valores obtidos na simulação executada com período máximo de um ano.

Os valores obtidos em cada simulação são automaticamente armazenados no arquivo denominado “CQR.OTP”. Após sua leitura, este módulo monta o novo arquivo de entrada da próxima rodada (“CQR.DAT”) do CE-QUAL-R1 preenchendo os valores do novo perfil inicial da represa (perfil de partida) exclusivamente com os valores resultantes armazenados no arquivo “CQR.OTP” da rodada anterior. Quando esse módulo está em uso o módulo de interpolação não é usado.

5.2.6 Módulo “modLerAcquanet.bas”

Este módulo é responsável pela execução de dois procedimentos. Um deles é conectar-se ao cenário (arquivo com extensão *.mdb) do ACQUANET escolhido pelo usuário, tanto para visualizar os principais dados como para preencher as células azuis do formulário “Form6.frm” com os valores de vazões ótimas obtidas pelo modelo ACQUANET. Este procedimento é chamado pelos botões (“Visualiza Arquivo” e “Carrega Arquivo”) existentes na tela do formulário “Form4.frm”.

O outro procedimento existente neste módulo faz o cálculo do nível d’água (elevação) na represa com base nos volumes obtidos no início e fim de cada mês de simulação dos arquivos do ACQUANET, tanto para Simulação Contínua como para Planejamento Tático. Este procedimento foi escrito com base na teoria de Tartaglia, que calcula as raízes de equações de 3º grau, referentes à Curva Cota-Área-Volume da represa de estudo. Este procedimento é chamado para verificar em cada mês de simulação do ACQUANET os níveis d’água mínimos para liberação, ou não-liberação, das tomadas seletivas de água, assim como habilitar ou não o uso do vertedor, conforme descrito no formulário “Form6.frm”.

5.2.7 Módulo “modMontaGrain5.bas”

Este módulo sempre é chamado pelo “modMontarCQRdat2.bas” assim que o arquivo de entrada estiver pronto para rodar o CE-QUAL-R1. Este é o módulo que chama o executável do modelo CE-QUAL-R1 denominado CEQUALR1.EXE para rodar um ano de simulação.

Além disso, este módulo chama outro executável do pacote do CE-QUAL-R1, capaz de ler os valores armazenados no arquivo de resultados “CQR.OTP”, podendo ser visualizados na forma similar a uma planilha, porém não na forma de dados, pois o arquivo gerado (GRAOTP.DAT), assim como todos os do pacote do modelo, está na forma de texto.

Este módulo também é responsável pelo salvamento dos arquivos usados (entrada e saídas) em pastas do disco rígido separadas daquela onde rodam os arquivos executáveis do pacote do CE-QUAL-R1, separando e nomeando as pastas conforme o tipo de rodada: CALIBRAÇÃO ou SIMULAÇÃO (Simulação Contínua ou Planejamento Tático).

6. ESTUDO-DE-CASO: REPRESA JAGUARI-JACAREÍ

Para estudo-de-caso foi escolhida a Represa Jaguari-Jacareí, integrante do Sistema Cantareira, operado em São Paulo pela Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo (SABESP).

Para tanto, serão descritos: suas principais características e seu nível de importância para seu principal uso, abastecimento público, além dos demais sistemas produtores de São Paulo.

6.1 Sistemas Produtores da RMSP

Para atendimento à crescente demanda de água para abastecimento da Região Metropolitana de São Paulo (RMSP), a SABESP, concessionária dos serviços de água e esgoto, atuante em 366 municípios paulistas, opera sete grandes sistemas produtores, sendo então responsável pelo fornecimento de água para mais de 18 milhões de pessoas, conforme tabela a seguir:

Tabela 6.1 - Sistemas Produtores, Vazões Fornecidas e População Atendida na RMSP (2003)⁵¹

Sistema Produtor	Qmédia 2003 (m³/s)	População Atendida (milhões)
Cantareira	31,34	8,8
Guarapiranga	13,37	3,7
Alto Cotia	0,99	0,4
Baixo Cotia	0,87	0,3
Rio Grande	4,73	1,2
Alto Tietê	9,63	2,7
Rio Claro	3,75	0,9
Rib. Estiva	0,09	0,02
TOTAL	64,78	18,0

6.1.1 Sistema Rio Claro

Concebido em 1937 e sendo objeto de estudos do escritor e também engenheiro Euclides da Cunha, o Sistema Rio Claro está localizado a cerca de 130 km de São Paulo, no extremo Leste da RMSP, ocupando parte dos municípios de Salesópolis, Biritiba-mirim e Santos.

É composto pela Represa Ribeirão do Campo, capaz de regularizar 1,0 m³/s e que, complementando a vazão do rio Claro, tem sua primeira captação em Poço Preto com 2,55 m³/s, sendo aduzida por gravidade até a ETA Casa Grande. À jusante deste ponto o rio Claro recebe outra contribuição feita pela elevatória do Rio Guaratuba já na vertente da Serra do Mar, que reverte até 0,65 m³/s das suas águas. A última captação é feita no denominado Km 76, uma estação elevatória situada no rio Claro que recalando cerca de 1,35 m³/s complementa a vazão de 3,90 m³/s para a ETA Casa Grande.

⁵¹ Fonte: Sabesp

A vazão tratada segue por gravidade até a região leste de São Paulo. A vazão remanescente do rio Claro aflui até a Represa Ponte Nova, integrante do Sistema Alto Tietê. A bacia hidrográfica do Sistema Rio Claro em quase sua totalidade é de propriedade da Sabesp e é caracterizado pelo ótimo estado preservação de sua flora e fauna, principalmente por pertencer ao Parque Estadual da Serra do Mar e pelo difícil acesso.

6.1.2 Sistema Alto Tietê

As represas integrantes desse sistema foram, no passado, construídas pelo Departamento de Águas e Energia Elétrica (DAEE) para controle de cheias da RMSP e, posteriormente, em 1993, passaram a servir como abastecimento com a entrada em operação da ETA Taiaçupeba.

O sistema abrange os municípios de Salesópolis, Biritiba-mirim e Suzano na região leste da RMSP e tem atualmente como concepção: a Represa Ponte Nova que regula as vazões liberadas para o rio Tietê; as águas do Tietê são captadas na Estação EEAB de Biritiba inaugurada em abril de 1999 que é capaz de bombear atualmente 6,3 m³/s para o dique da Represa de Biritiba, em estágio final de construção; a vazão segue por gravidade através de canais e túnel até a Represa Jundiaí cujas águas também são transferidas por gravidade até a Represa Taiaçupeba onde é efetuada a captação na EEAB para a ETA Taiaçupeba.

O sistema terá maior capacidade de regularização quando: a Represa Taiaçupeba puder ser completamente inundada o que poderá elevar seu nível em 6,0 m, fato este que ainda não ocorreu pela existência da empresa Manikraft e outras ocupações na bacia de drenagem e; com a futura inundação das Represas Biritiba e Paraitinga.

6.1.3 Sistema Rio Grande

Originário da secção de um dos braços da Represa Billings em 1958, a Represa Rio Grande tem sua captação (EEAB) e ETA situadas nas proximidades da rodovia Anchieta, no município de São Bernardo do Campo, abastecendo a população do ABCD paulista.

A Represa Rio Grande não recebe as águas da Represa Billings mas a vazão excedente afluente à Represa Rio Grande é vertida para a Represa Billings através de sifões instalados no corpo do barramento que separa as duas represas.

Na maioria do tempo o nível d'água da Represa Rio Grande permanece mais alto em relação à Represa Billings, cujas águas são aproveitadas: para geração de energia elétrica na Usina Henry Borden, situada na baixada santista e; para abastecimento da RMSP no Sistema Guarapiranga.

6.1.4 Sistema Guarapiranga

Data de 1929 e sua configuração conta com a Represa Guarapiranga, construída primeiramente para controle de cheias e ainda é de propriedade da EMAE (Castro, 2003) passando a servir também para abastecimento da RMSP a partir da década de 60 através da ETA ABV; tem sua disponibilidade hídrica complementada por duas transposições de bacia.

A transposição mais antiga é feita pela reversão do rio Capivari, pertencente à vertente marítima, situado na região sul de São Paulo, cujas águas são recalçadas por uma estação elevatória de uma represa de elevação de nível, reformada para bombear até 2,68 m³/s, até um

curso d'água retificado denominado Ribeirão Vermelho, afluente da Represa Guarapiranga; a outra reversão provém da Represa Billings, cuja estação elevatória flutuante inaugurada em 2001 está localizada no denominado Braço Taquacetuba e tem capacidade de bombear até 4,0 m³/s.

6.1.5 Sistema Alto Cotia

Sendo um sistema tão antigo quanto o Sistema Rio Claro, o Sistema Alto Cotia foi concebido em 1914 e é composto pela Represa Pedro Beicht, localizada no município de Cotia, dentro da Reserva Florestal do Morro Grande com cerca de 10,95 ha de área, de propriedade da SABESP. A tomada d'água desta represa pode ser feita em três níveis diferentes sendo então descarregada por uma válvula. A vazão descarregada segue pelo rio Cotia até a Represa Cachoeira da Graça onde é feita a captação pela EEAB, recalcando as águas até a ETA Alto Cotia.

Tal como o Sistema Rio Claro, é caracterizado pelo ótimo estado de conservação da flora e fauna, mas já está ameaçado por invasões de pescadores, caçadores e palmiteiros, que provocam a degradação ambiental.

6.1.6 Sistema Baixo Cotia

A vazão remanescente a jusante da Represa Cachoeira da Graça (vazões descarregadas e contribuições naturais) segue pelo rio Cotia até a elevação de nível conhecida como Isolinas sendo aduzida até a ETA Baixo Cotia.

6.1.7 Sistema Cantareira

Concebido inicialmente em 1973 e finalizado em 1983, está situado ao norte da RMSP, abrangendo os municípios de Bragança Paulista, Joanópolis, Piracaia, Vargem, Atibaia, Nazaré Paulista, Mairiporã, Franco da Rocha e São Paulo. É composto por: ETA Guaraú, Represa Águas Claras, Estação Elevatória Santa Inês, Represa Paiva Castro, Canal do rio Juqueri, Represa Atibainha, Represa Cachoeira e Represa Jaguari-Jacaré (Figuras 6.1 e 6.2).

As águas afluentes à Represa Jaguari-Jacaré têm suas nascentes no Estado de Minas Gerais pelo rio Jaguari. São retiradas por uma tomada d'água seletiva construída com seis comportas instaladas em três níveis diferentes no emboque do Túnel 7; a vazão vertida por cima dessas comportas segue por gravidade até a Represa Cachoeira seguindo por gravidade até a Represa Atibainha através do Túnel 6. Desta, segue por gravidade através do Túnel 5 e Canal do rio Juqueri até a Represa Paiva Castro, cujas águas são recalçadas até a Represa Águas Claras através da Estação Elevatória Santa Inês seguindo por gravidade até a ETA Guaraú.

6.2 Integração entre os sistemas produtores

A integração dos sistemas produtores operados pela SABESP é feita através de uma malha de mais de 1200 km de adutoras, 25 mil quilômetros de redes distribuidoras e 135 reservatórios setoriais conhecida como Sistema Adutor Metropolitano (SAM).

O SAM é gerenciado pelo Centro de Controle Operacional utilizando como ferramenta de apoio o software SCOA. O gerenciamento dos sistemas produtores da RMSP é auxiliado pelo software “Sistema de Suporte a Decisão para Operação dos Grandes Sistemas Produtores”

(SSD - Sabesp) desenvolvido pelo LabSid/USP, do qual o ACQUANET é um de seus componentes.

6.3 A Represa Jaguari-Jacareí

É formada pelo barramento de dois cursos d'água: barragem do rio Jaguari (Figura 6.1) e barragem do rio Jacareí. Um canal de ligação, medindo 670,00 m de comprimento e de seção trapezoidal com 10,00 m de base, construído a partir da cota 818,00 m da represa Jaguari com declividade direcionada no sentido: represa Jaguari – represa Jacareí, interliga ambas as represas e faz com que os espelhos d'água, formados pelos dois barramentos, fiquem sempre no mesmo nível d'água formando uma única represa, portanto, um único espelho d'água, tal como ilustrado na Figura 6.2 (GESP/SES/SABESP, 1989).

Figura 6.1 - Vista parcial da Represa Jaguari-Jacareí (barragem do rio Jaguari, saída das válvulas difusoras e vertedor)

Figura 6.2 - Localização da Represa Jaguari-Jacaré no Sistema Cantareira em São Paulo

As estruturas de controle da Represa Jaguari-Jacaré são: um vertedor Crieiger situado na cota 835,00 m em concreto construído na barragem do rio Jaguari (Figura 6.1), cuja vazão do

vertedor é regulada por três comportas de 6,0 m de extensão cada uma; um conjunto de duas válvulas dispersoras (descarregador de fundo) do tipo Howell-Bunger em cada uma das barragens (Figura 6.1), com diâmetro de 1000 mm, localizadas no fundo de cada barramento (cotas de eixo com 798,15 m e 799,02 m respectivamente em Jaguari e Jacareí), além da citada tomada seletiva construída no emboque do Túnel 7 (GESP/SES/SABESP, 1989).

Cada válvula dispersora é capaz de retirar até 18,0 m³/s da represa, conforme abertura e carga hidráulica, e o vertedor tem capacidade de descarregar até 1200 m³/s.

A estrutura do Túnel 7 (Figuras 6.3 e 6.4) é composta de 6 comportas, cada uma com 1,50 m de largura e 8,00 m de altura, dispostas em 3 pares, estando: as comportas 1 e 2 no nível de soleira em 818,00 m; as comportas 3 e 4 no nível de soleira em 827,00 m e; comportas 5 e 6 no nível de soleira em 836,00 m (GESP/SES/SABESP, 1989).

Figura 6.3 - Corte da Tomada Seletiva localizada no emboque do Túnel 7

A capacidade de transferência do Túnel 7 varia de acordo com os níveis de água da Represa Jaguari-Jacareí situada à montante e da Represa Cachoeira situada à jusante do Túnel 7, sendo 35,00 m³/s a capacidade máxima de adução. O volume disponível para captação e o volume morto totalizam 1,037*10⁹ m³, sendo 844,00 m a cota máxima normal de operação e 845,00 m a cota *máxi maximorum* (GESP/SES/SABESP, 1989).

Figura 6.4 - Planta e vista frontal da tomada seletiva

6.4 Justificativa para a escolha da Represa Jaguari-Jacareí para Estudo de Caso

A INTERFACE será utilizada na Represa Jaguari-Jacareí que, isoladamente, representa cerca de 35 % da produção de água da RMSP, um nível significativo face à demanda de São Paulo, o que justifica sua aplicação e escolha como estudo-de-caso.

A escolha desta represa como estudo-de-caso justifica-se também: pela *existência de tomada seletiva* na estrutura de captação, cujo emprego é previsto no modelo CE-QUAL-R1 e; pela

disponibilidade razoável de dados de quantidade e qualidade de água. Além disso, poucos estudos foram feitos no passado nessa represa com modelos matemáticos de qualidade.

6.5 Tratamento de Dados para Uso da INTERFACE

Os dados quantitativos disponíveis da Represa Jaguari-Jacareí compreendem uma série histórica de cerca de 10 anos (1991-1999), o que inclui principalmente: vazões naturais, vazões retiradas, descarregadas e vertidas, dados meteorológicos.

Os dados qualitativos disponíveis da Represa Jaguari-Jacareí referem-se a uma série histórica de cerca de 10 anos (1991-1999), o que inclui: constantes de qualidade de água das represas e dos tributários (bacia hidrográfica).

Os dados meteorológicos usados, necessários para o arquivo de entrada do CE-QUAL-R1, foram: *vento*, *pressão atmosférica*, *temperatura de bulbo seco*, medidos na “**Estação M1**⁵²” da Sabesp, além de *cobertura de nuvens / tempo de insolação e temperatura de ponto de orvalho*, calculados separadamente com base nos valores lidos em M1, tais como número de nuvens visualizadas (baixas, médias e altas), temperatura de bulbo úmido. Para utilização do modelo adotou-se o vento resultante medido a dois metros de altura no anemômetro.

6.5.1 Cobertura de Nuvens

A contagem de nuvens em M1 é feita diariamente às 9:00h, 15:00h e 21:00h. Em cada horário existe a contagem de 0 a 8 para nuvens altas, médias e baixas. A cobertura de nuvens diária,

⁵² M1 é a estação meteorológica da Sabesp situada na barragem Jaguari e que coleta dados de pluviometria, temperaturas, vento, pressão atmosférica, cobertura de nuvens, evaporação.

que serviu como um dos dados de entrada para o modelo CE-QUAL-R1, foi estabelecida da seguinte forma:

Para os dias onde em M1 *havia* leitura de *cobertura de nuvens*, foi adotado o seguinte procedimento:

$$MA = [AN9 + (2 * AN15) + AN21]/4 \quad (6.1)$$

$$MM = [MN9 + (2 * MN15) + MN21]/4 \quad (6.2)$$

$$MB = [BN9 + (2 * BN15) + BN21]/4 \quad (6.3)$$

$$Nuvens = Máximo(MA;MM;MB)/8 \quad (6.4)$$

onde: AN9, AN15 e A21 = número de nuvens altas lido às 9h, 15h e 21h;

MN9, MN15 e M21 = número de nuvens médias lido às 9h, 15h e 21h;

BN9, BN15 e B21: = número de nuvens baixas lido às 9h, 15h e 21h;

MA, MM e MB = média ponderada entre nuvens altas, médias e baixas;

Nuvens = cobertura de nuvens que corresponde ao valor máximo de MA, MM ou MB, dividido por 8.

Para os dias onde em M1 *não havia* leitura de *cobertura de nuvens*, foi adotado o seguinte procedimento:

$$Nuvens = \frac{Hss}{HMáxs} \quad (6.5)$$

onde: Hss = número de horas em que não houve insolação;

HMáxs = número máximo de horas possível ao mês correspondente⁵³;

Nuvens = cobertura de nuvens (nomenclatura usada no arquivo “CQANJJQQ_resumo.xls”).

⁵³ Fonte: Villa Nova (1967), “dados interpolados de Smithsonian Meteorological Tables, 6ª edição, 1951, tabela 171”.

O HMáxs obedece à seguinte regra:

Tabela 6.2 - Número máximo de horas de insolação

Mês	HMáxs (horas)
Janeiro	13,4
Fevereiro	12,8
Março	12,2
Abril	11,6
Mai	11,1
Junho	10,8
Julho	10,9
Agosto	11,3
Setembro	12,0
Outubro	12,6
Novembro	13,2
Dezembro	13,5

6.5.2 Temperatura de Ponto de Orvalho

Para cada horário de leitura da M1 (9:00h, 15:00h e 21:00h), a *temperatura do ponto de orvalho*⁵⁴ foi calculada da seguinte forma:

$$e_{swb} = \text{EXP}(((16,78 * T_{wb}) - 116,9)/(T_{wb} + 237,3)) \quad (6.6)$$

$$e_{sdb} = \text{EXP}(((16,78 * T_{db}) - 116,9)/(T_{db} + 237,3)) \quad (6.7)$$

$$A = 0,00066 * (1 + (0,0015 * T_{wb})) \quad (6.8)$$

$$e_d = e_{swb} - ((A * P * 1,36) * (T_{db} - T_{wb})) \quad (6.9)$$

$$T_{dew} = (116,9 + (237,3 * \ln(e_d)))/(16,78 - \ln(e_d)) \quad (6.10)$$

⁵⁴ Fonte: Relative Humidity Equations (2003).

onde: T_{dew} = temperatura do ponto de orvalho ($^{\circ}\text{C}$)

T_{db} = temperatura do bulbo seco ($^{\circ}\text{C}$), lido no psicrômetro da M1

T_{wb} = temperatura do bulbo úmido ($^{\circ}\text{C}$), lido no psicrômetro da M1

P = pressão atmosférica (mmHg), lida no barômetro da M1

e_{swb} = pressão de vapor de saturação do ar úmido (kPa)

e_{sdb} = pressão de vapor de saturação do ar seco (kPa)

e_d = pressão de vapor (kPa)

A = fator de conversão ($^{\circ}\text{C}^{-1}$)

A T_{dew} diária para entrada no CE-QUAL-R1 foi calculada com base na média ponderada entre os três resultados, tendo peso 2 o T_{dew} das 21:00h, uma vez que a variação até a leitura seguinte é de doze horas.

A série histórica diária de dados meteorológicos observados na estação M1 (temperaturas, vento, pressão barométrica etc.) apresentava diversas falhas, desde pequenos intervalos diários até falhas de meses consecutivos. Para as pequenas e médias falhas, adotou-se, como procedimento de preenchimento de falhas, a interpolação de dados entre o dia anterior e posterior aos dias da falha; para as falhas maiores adotou-se o cálculo da média histórica diária. A adoção de outra estação meteorológica para correlação e preenchimento de falhas foi abandonada em virtude do custo financeiro para aquisição de dados.

6.5.3 Vazões naturais afluentes

Os dados de contribuição natural dos cenários do ACQUANET foram obtidos previamente do HIDROPLAN (Barros, 19950), sendo parte reconstituído pelos autores e parte calculado com

base nos valores fornecidos pela Sabesp na operação das represas do Sistema Cantareira, obtidos por balanço hídrico. As vazões naturais dos cenários do ACQUANET, entretanto, referentes às Represas Jaguari e Jacareí, tal como os dados atualmente calculados pela Sabesp, foram condensados e, dessa forma, as represas foram consideradas apenas um corpo d'água, ou seja, para uso do ACQUANET a contribuição natural de cada represa é um único valor de vazão mensal. A fim de se padronizar as simulações de quantidade e quantidade, tal simplificação foi adotada também para o CE-QUAL-R1, sendo considerada, portanto, a Represa Jaguari e a Represa Jacareí apenas um único corpo d'água – a Represa Jaguari-Jacareí.

Atendendo à padronização de dados de qualidade e quantidade de água adotada na INTERFACE, as **Vazões Ótimas MENSAS** obtidas nas simulações do ACQUANET foram convertidas em **Vazões Ótimas DIÁRIAS** nas simulações do CE-QUAL-R1.

A fim de se simular dois tributários afluentes da represa, procedeu-se ao cálculo estimado das vazões naturais do rio Jaguari (tributário 1) com base nos dados observados do posto Fluviométrico F-25B da Sabesp e do rio Jacareí somado a um afluente inominado (tributário 2), estes, obtidos pela diferença entre os valores observados em F-25B e os valores diários calculados por balanço hídrico.

O cálculo de balanço hídrico da represa em estudo, para obtenção da contribuição natural diária obedece à seguinte formulação:

$$\frac{V_h - V_o}{\Delta t} = Q_{n1} - Q_{t7} - Q_{jus} \quad (6.11)$$

onde: V_h = volume atual ($10^6 m^3$)

V_o = volume anterior ($10^6 m^3$)

Q_{n1} = soma da contribuição natural média das Represas Jaguari e Jacaréi (m^3/s)

Q_{t7} = vazão média aduzida pelo Túnel 7 para a Represa Cachoeira (m^3/s)

Q_{jus} = soma das vazões médias descarregadas pelas válvulas difusoras das Represas Jaguari, Jacaréi e pelo Vertedor da Barragem do rio Jaguari (m^3/s)

Δt = 86400 segundos, para variação diária

De 01/01/1990 a 31/08/1990, período em que não há leitura dos posto F-25B, foi aplicado o coeficiente 0,9 nos dados diários de evaporação, medidos na M1, multiplicando-os pela área do espelho d'água e dividindo pelo número de segundos, incrementando-se as vazões naturais obtidas com a eq. (6.11) e **compensando a perda por evaporação** na represa. De 01/09/1990 até 31/12/1999 os dados de evaporação não foram usados devido à existência dos dados do posto F-25B no período. Para cada dia da série foram aplicadas as fórmulas a seguir:

$$Q_{JJ206F25B} = Q_{F25B} \quad (6.12)$$

$$Q_{JJ208} + Q_{JJ209} = |Q_{n1} - Q_{JJ206F25B}| \quad (6.13)$$

$$Q_{JJ206F25B}' = (Q_{n1} * 0.82) + Ev1 \quad (6.14)$$

$$Q_{JJ208} + Q_{JJ209}' = |Q_{n1} - Q_{JJ206F25B}'| + Ev2 \quad (6.15)$$

$$Ev1 = 0.9 * (E/1000) * Ar * 0.82 / 86400 \quad (6.16)$$

$$Ev2 = 0.9 * (E/1000) * Ar * (1 - 0.82) / 86400 \quad (6.17)$$

onde: $Ev1$ = efeito de evaporação no rio inominado e rio Jacaréi antes de 01/09/90 (m^3/s)

$Ev2$ = efeito de evaporação no rio Jaguari antes de 01/09/90 (m^3/s)

$Q_{JJ206F25B}'$ = vazão natural no rio Jaguari antes de 01/09/90 (m^3/s)

QJJ208+JJ209' = vazão natural no afluente inominado e rio Jacaré antes de

01/09/90 (m^3/s)

QJJ206F25B = vazão natural no rio Jaguari após 01/09/90 (m^3/s)

QJJ208+JJ209 = vazão natural no afluente inominado e rio Jacaré após

01/09/90 (m^3/s)

QF25B = vazão lida no posto F-25B da Sabesp após 01/09/90 (m^3/s)

E = altura evaporimétrica lida em M1 (mm)

Ar = área do espelho d'água da represa (m^2)

Qn1 = soma da contribuição natural média das Represas Jaguari e Jacaré (m^3/s)

As nomenclaturas JJ206F25B e JJ208+JJ209 foram introduzidas no arquivo “CQANJJQ_resumo.xls” lidas pela INTERFACE e uso no CEQUAL-R1 nas fase de CALIBRAÇÃO e SIMULAÇÃO.

Como resultado do tratamento das vazões de contribuição natural, **obteve-se um acréscimo da Qn total da represa Jaguari-Jacaré pelo efeito de evaporação de aproximadamente 6,00 %**, aumentado de 23,8 m^3/s para 25,2 m^3/s o valor médio da série de 1990 a 1999. Além disso, foi constatado que o posto F-25B, portanto, o rio Jaguari, representa cerca de 82 % da vazão total afluente a represa.

6.5.4 Vazões de Transferência, Descarregadas e Vertidas

Os dados das vazões operadas na represa de estudo são provenientes dos boletins de operação do setor responsável da Sabesp. A nomenclatura utilizada pela INTERFACE, para ativar o

CE-QUAL-R1 e utilizar os dados de vazões operadas na fase de calibração, está descrita a seguir:

QT7:S1 = vazão captada na comporta 6 da tomada seletiva (m^3/s)

QT7:S2 = vazão captada na comporta 5 da tomada seletiva (m^3/s)

QT7:S3 = vazão captada na comporta 4 da tomada seletiva (m^3/s)

QT7:S4 = vazão captada na comporta 3 da tomada seletiva (m^3/s)

QT7:S5 = vazão captada na comporta 2 da tomada seletiva (m^3/s)

QT7:S6 = vazão captada na comporta 1 da tomada seletiva (m^3/s)

QT7:S7 = soma das vazões descarregadas pelas válvulas difusoras
das Barragens Jaguari e Jacaré (m^3/s)

Qvert = vazão descarregada pelo vertedor da Barragem Jaguari (m^3/s)

Essa nomenclatura foi introduzida no arquivo “CQANJJQ_resumo.xls”, lido pela INTERFACE e uso no CEQUAL-R1 na fase de CALIBRAÇÃO.

As vazões captadas pelas comportas 1 a 6 da tomada seletiva da Represa Jaguari-Jacaré são aduzidas pelo Túnel 7 até a Represa Cachoeira.

6.5.5 Curva Cota-Área-Volume

As equações de curva cota-volume utilizadas pela Sabesp para as represas Jaguari e Jacaré foram somadas e transformadas na forma requerida para uso modelo CE-QUAL-R1. A forma original das equações cota-volume era:

$$\text{Volume} = (B0 * H) + (B1 * H^2) + (B2 * H^3) + (B3 * H^4) \quad (6.18)$$

onde: Volume (m³)

H = cota do nível d'água (m)

B0 = -5,6531709200E+08

B1 = 2,4669966137E+06

B2 = -3,5189523806E+03

B3 = 1,6481481476E+00

B0, B1, B2 e B3 correspondem à soma dos coeficientes da equação de cada represa, Jaguari e Jacareí. Após a conversão a eq. (6.18) ficou escrita da seguinte forma:

$$\text{Volume} = (\text{ACOE}(1) * Z) + [(\text{ACOE}(2) * Z^2)/2] + [(\text{ACOE}(3) * Z^3)/3] \quad (6.19)$$

onde: ACOEF(1) = 135794,8

ACOE(2) = 852625,7

ACOE(3) = 5046,280

Z é elevação do nível d'água expressa como:

$$Z = H - 798,7 \text{ (m)} \quad (6.20)$$

Conseqüentemente, a equação cota-área usada pelo CE-QUAL-R1 ficou escrita da seguinte forma:

$$\text{Area} = \text{ACOE}(1) + (\text{ACOE}(2) * Z) + [(\text{ACOE}(3) * Z^2)] \quad (6.21)$$

Os coeficientes ACOEF(1), ACOEF(2) e ACOEF(3) foram introduzidos internamente na INTERFACE.

6.5.6 Vazões naturais no modelo ACQUANET

As vazões utilizadas no modelo ACQUANET são provenientes de duas etapas de estudo:

A primeira diz respeito às vazões calculadas para as bacias do Alto Tietê e Piracicaba descritas no HIDROPLAN (Barros, 1995). Neste estudo foram calculadas as vazões naturais, reconstituindo-se a série original de vazões, isto é, excluindo-se as vazões demandadas para abastecimento urbano (inclusive Sistema Cantareira), indústria e agricultura em algumas seções de interesse, no período de 1930 a 1993.

A segunda etapa refere-se a um novo estudo, específico para o presente trabalho, com metodologia similar, para o período de 1994 a 2003. Neste estudo, procedeu-se à reconstituição das vazões considerando-se apenas as vazões descarregadas, vertidas e retiradas para abastecimento do Sistema Cantareira, cujos dados estavam disponíveis; as demais vazões necessárias, porém não tão significantes para o estudo por serem de 2ª ordem e pela dificuldade de obtenção, foram desprezadas.

Para introduzir as vazões reconstituídas no ACQUANET foi preciso calcular nó a nó as vazões correspondentes às respectivas bacias de drenagem, abatendo-se sempre a vazão do nó anterior, de maneira que a soma, nó a nó, correspondesse às vazões reconstituídas descritas na 1ª e 2ª etapas.

De maneira geral, o cálculo foi feito da seguinte forma:

$$Q_{nrPir} = Q_{nJJ'} + Q_{nPir'} \quad (6.22)$$

onde: Q_{nrPir} = vazão reconstituída na seção Piracicaba (m^3/s)

$Q_{nJJ'}$ = vazão no nó de represa Jaguari-Jacerí do modelo ACQUANET obtido diretamente das vazões reconstituídas, descritas na 1ª e 2ª etapas (m^3/s)

$Q_{nPir'}$ = vazão no nó de demanda Piracicaba do modelo ACQUANET (m^3/s)

6.5.7 Parâmetros de Qualidade de Água

Para o arquivo de entrada do CE-QUAL-R1 foram usados os seguintes *parâmetros de qualidade* medidos na represa e bacia de contribuição: *temperatura, pH, nitrogênio nítrito e nítrato, nitrogênio amoniacal, fosfato, ferro, manganês, coliformes fecais e totais*, não sendo possível o uso de outros valores por inexistência de análises na série ou por existência de alguns valores esporádicos. Para utilização de tais parâmetros, no entanto, foi necessário ajustar diversas curvas anuais (inserção de polinômios de até 6º grau através das “Curvas de Tendência” da planilha MS-Excel) cujas equações matemáticas possibilitaram a geração de valores diários (ver exemplo no Anexo C), pois a série de dados de qualidade dispunha, no máximo, de valores mensais.

Os dados de qualidade dos tributários foram aqueles coletados nos pontos JJ-206 (rio Jaguari) e a média entre os pontos JJ-208 e JJ-209 (rio Jacaré e outro afluente inominado), totalizando apenas dois rios tributários simulados no CE-QUAL-R1.

Os valores diários obtidos no ajuste das equações foram organizados para serem lidos pela INTERFACE obedecendo a seguinte nomenclatura:

JJ206TEMP = temperatura da água no rio Jaguari lida no ponto JJ206 (°C)

JJ206COLT = coliformes totais no rio Jaguari lidos no ponto JJ206 (NMP/100ml)

JJ206COLF = coliformes fecais no rio Jaguari lidos no ponto JJ206 (NMP/100ml)

JJ206CNH4 = nitrogênio amoniacal no rio Jaguari lido no ponto JJ206 (mg/l N)

JJ206PO4 = fosfato total lido no rio Jaguari no ponto JJ206 (mg/l PO4)

JJ206PH = pH lido no rio Jaguari no ponto JJ206

JJ206CNO3 = soma de nitrito e nitrato lidos no rio Jaguari no ponto JJ206 (mg/l N)

JJ208med209TEMP = temperatura da água, média entre os postos JJ206 e JJ208 (°C)

JJ208med209COLT = coliformes totais, média entre os postos JJ206 e JJ208 (NMP/100ml)

JJ208med209COLF = coliformes fecais, média entre os postos JJ206 e JJ208 (NMP/100ml)

JJ208med209CNH4 = nitrogênio amoniacal, média entre os postos JJ206 e JJ208 (mg/l N)

JJ208med209PO4 = fosfato total, média entre os postos JJ206 e JJ208 (mg/l PO4)

JJ208med209PH = pH, média entre os postos JJ206 e JJ208

JJ208med209CNO3 = soma de nitrito e nitrato, média entre os postos JJ206 e JJ208 (mg/l N)

Essa nomenclatura foi introduzida no arquivo “CQANJJQ_resumo.xls”, que foi lido pela INTERFACE e utilizado no CEQUAL-R1 nas fases de CALIBRAÇÃO e SIMULAÇÃO.

Os valores dos parâmetros de qualidade dos tributários necessários para as simulações, foram em parte, obtidos pela média da série histórica, sendo introduzidos no código da INTERFACE e usados nas fases de CALIBRAÇÃO e SIMULAÇÃO do CE-QUAL-R1. Os valores estão descritos na Tabela 6.3 a seguir

Tabela 6.3 - Valores dos Parâmetros de Qualidade simulados no CE-QUAL-R1 para o Rio Jaguari (Tributário 1 – JJ206)

Código Parâm.	Descrição dos Parâmetros	Unidade	Valor Adotado
1ALG	1º Compartimento de algas	mg/ℓ	0**
2ALG	2º Compartimento de algas	mg/ℓ	0**
3ALG	3º Compartimento de algas	mg/ℓ	0**
ALKA	Alcalinidade	mg/ℓ CaCO ₃	11,4*
DOML	M.O. dissolvida lábil	mg/ℓ	0,35 a 3,80**
CNH4	Amônia	mg/ℓ N	JJ206CH4
CNO3	Nitrito + Nitrato	mg/ℓ N	JJ206CNO3
DOMR	M.O dissolvida refratária	mg/ℓ seco	3,03 a 15,13**
COL	Coliformes (totais ou fecais)	col/100 ml	JJ206COLF
DET	Detritos	mg/ℓ seco	0,7**
OXY	Oxigênio dissolvido	mg/ℓ	7,5**
PO4	Fosfato	mg/ℓ P	JJ206PO4
SI	Sílica	mg/ℓ	0**
TEMP	Temperatura da água	°C	JJ206TEMP
TDS	Sólidos dissolvidos totais	mg/ℓ	35,0*
SSOL	Sedimentos Suspensos	mg/ℓ	25,0*
PH	pH	-	JJ206PH
MN4	Mn(IV)	g/m ³	0,027*
MN2	Mn ⁺²	g/m ³	0,042*
FE3	Fe(III)	g/m ³	0,149*
FE2	Fe ⁺²	g/m ³	4,452*
FESB	FeS	g/m ³	0**
SO4	SO ₄ ⁻	g/m ³	0,7**
S2	S ⁻²	g/m ³	0**

(*) valores obtidos com base na média da série histórica

(**) valores adotados com base em coletas esporádicas

Os demais parâmetros definidos para o rio Jacaré e rio inominado estão descritos na Tabela 6.4 a seguir:

Tabela 6.4 - Valores dos Parâmetros de Qualidade simulados no CE-QUAL-R1 para o Rio Jacaré e rio inominado (Tributário 2 – JJ208med209)

Código Parâm.	Descrição dos Parâmetros	Unidade	Valor Adotado
1ALG	1ºCompartimento de algas	mg/ℓ	0**
2ALG	2ºCompartimento de algas	mg/ℓ	0**
3ALG	3ºCompartimento de algas	mg/ℓ	0**
ALKA	Alcalinidade	mg/ℓ CaCO ₃	17,4**
DOML	M.O. dissolvida lábil	mg/ℓ	1,91**
CNH4	Amônia	mg/ℓ N	JJ208med209CH4
CNO3	Nitrito + Nitrato	mg/ℓ N	JJ208med209CNO3
DOMR	M.O dissolvida refratária	mg/ℓ seco	7,65**
COL	Coliformes (totais ou fecais)	col/100mℓ	JJ208med209COLF
DET	Detritos	mg/ℓ seco	0,07**
OXY	Oxigênio dissolvido	mg/ℓ	7,5**
PO4	Fosfato	mg/ℓ P	JJ208med209PO4
SI	Sílica	mg/ℓ	0**
TEMP	Temperatura da água	°C	JJ208med209TEMP
TDS	Sólidos dissolvidos totais	mg/ℓ	22,0*
SSOL	Sedimentos Suspensos	mg/ℓ	10,0*
PH	pH	-	JJ208med209PH
MN4	Mn(IV)	g/m ³	0,027*
MN2	Mn ⁺²	g/m ³	0,059*
FE3	Fe(III)	g/m ³	0,149*
FE2	Fe ⁺²	g/m ³	3,064*
FESB	FeS	g/m ³	0**
SO4	SO ₄ ⁻	g/m ³	0,7**
S2	S ⁻²	g/m ³	0**

(*) valores obtidos com base na média da série histórica

(**) valores adotados com base em coletas esporádicas

Os valores dos parâmetros de qualidade da *Represa Jaguari-Jacaré* (para uso como *condição inicial* do modelo), necessários para as simulações, são em parte, obtidos por

interpolações com valores existentes via INTERFACE entre as profundidades medidas por temperatura em cada simulação. Os que não estavam disponíveis para a interpolação foram obtidos pela média da série histórica ou simplesmente adotados. Os valores utilizados estão descritos na tabela 6.5 a seguir:

Tabela 6.5 - Parâmetros usados no CE-QUAL-R1 como Condição Inicial da Represa Jaguari-Jacareí

Grupo	Código Parâm.	Descrição do Parâmetro	Unidade	Valor Adotado
INIT2	DALGAI	1º Compartimento de Algas	mg/l (seco)	0,001**
	DALGA2	2º Compartimento de Algas	mg/l (seco)	0**
	DALGA3	3º Compartimento de Algas	mg/l (seco)	0,001**
	DALKA	Alcalinidade	mg/l CaCO ₃	0,002**
	DCNH3	Amônia	mg/l N	0,059*
	DCNO3	Nitrito + Nitrato	mg/l N	0,211*
	DCRFR	M.O. refratária dissolvida	mg/l (seco)	0,002**
	DCOLIF	Coliformes fecais ou totais	Ncol/100ml	50 ou 971*
INIT3	DDETUS	Detritos orgânicos	mg/l (seco)	0,0002**
	DDOM	M.O. lábil dissolvida	mg/l	2,4**
	DOXY	Oxigênio dissolvido	mg/l	5,274*
	DPO4	Fósforo disponível ou ortofosfato	mg/l P	0,022*
	DSEDMT	Sedimentos orgânicos	g/m ²	0,001**
	DTEMP	Temperatura da água	°C	19,74*
	DTDS	Sólidos dissolvidos totais	mg/l	20,0**
	DZOO	Compartimento de zooplâncton	mg/l (seco)	0,001**
	DPH	pH	-	7,1*
INIT4	DSSOL	Sólidos suspensos	mg/l	15,0**
	DCMN4	Mn(IV)	g/m ³	0,027*
	DCMN2	Mn ⁺²	g/m ³	0,058*
	DFE3	Fe(III)	g/m ³	0,149*
	DFE2	Fe ⁺²	g/m ³	0,892*
	DFESB	FeS na coluna d'água	g/m ³	0**

continua

conclusão

Grupo	Código Parâm.	Descrição do Parâmetro	Unidade	Valor Adotado
INIT4	DSO4	SO ₄ ⁻²	g/m ³	0,04**
	DS2	S ⁻²	g/m ³	0**
	DCMN	Mn no sedimento	g/m ³	0,058**
INIT5	DFE	Fe no sedimento	g/m ³	1,0**
	DFESA	FeS no sedimento	g/m ³	0**
	DS	S no sedimento	g/m ³	2,0**
	DXPO4	P inorgânico no sedimento	g/m ³	0,4**
	DCN	N inorgânico no sedimento	g/m ³	1,0**
	DSI	Sílica na coluna d'água	g/m ³	1,0**

(*) valor adotado caso não haja valor disponível para interpolação

(**) valor adotado

As taxas e coeficientes usados no CE-QUAL-R1 nas fases de CALIBRAÇÃO e SIMULAÇÃO foram simplesmente adotados dentro dos limites estabelecidos no manual do modelo e estão descritos na Tabela 6.6. a seguir:

Tabela 6.6 - Taxas e Coeficientes adotados nas fases de calibração e simulação do CE-QUAL-R1

Grupo	Taxa/Coef.	Unidade	Faixa de Uso	Valor Adotado		
				Alg1	Alg2	Alg3
ALG2 ALG3 ALG4	TPMAX	1/dia	-	1,2	0	0
	TSETL	m/dia	-	0,36	0	0
	PS2PO4	mg/l	-	0,002	0	0
	PS2N	mg/l	-	0,186	0	0
	PS2CO2	mg/l	-	0,2	0	0
	PISAT	kcal/m ² h	-	72,0	0	0
	TPEXCR	1/dia	-	0,014	0	0
	TPMORT	1/dia	-	0,032	0	0
	TPRESP	1/dia	-	0,02	0	0

continua

continuação

Grupo	Taxa/Coef.	Unidade	Faixa de Uso	Valor Adotado		
ALG5	PS2SI	mg/ℓ	-	0,05		
ALG1	EXTINP	1/m*mg/ℓ	0,4 a 0,045	0,1		
	ALDIGO	-	0 a 1	0,8		
	ALGAS	% peso seco	0,01 a 0,15	0,05		
				Alg1	Alg2	Alg3
ALG6 ALG7 ALG8	ALGxT1	°C	-	7,0	7,0	7,0
	ALGxT2	°C	-	38,0	38,0	38,0
	ALGxT3	°C	-	40,0	40,0	40,0
	ALGxT4	°C	-	42,0	42,0	42,0
	ALGxK1	-	-	0,1	0,1	0,1
	ALGxK4	-	-	0,1	0,1	0,1
PLANT1	TPLMAX	1/dia	0,5	0,5		
	TMRESP	1/dia	0,05	0,05		
	TMEXCR	1/dia	0,2	0,02		
	TMMORT	1/dia	0,03	0,03		
	PLDIGO(1)	-	0 a 0,3	0,2		
	PLDIGO(2)	-	0 a 0,4	0,35		
	PLDIGO(3)	-	0 a 0,5	0,45		
	TMPMAC	°C	1,5	1,5		
PLANT2	EXTINM	1/m*mg/ℓ	0,04	0,04		
	PLIMC	mg/ℓ	4,8	4,8		
	PLIMN	mg/ℓ	0,01	0,01		
	PLIMP	mg/ℓ	0,005	0,005		
	PLDENS	g(seco)/m³	40,0	40,0		
	PLITE	kcal/m²/h	112,0	112,0		
	PLFRAC	-	0,5	0,5		
	PLNTDEP	m	15,0	15,0		

continua

continuação

Grupo	Taxa/Coef.	Unidade	Faixa de Uso	Valor Adotado
PLANT3	PLTT1	°C	-	2,0
	PLTT2	°C	-	10,0
	PLTT3	°C	-	20,0
	PLTT4	°C	-	25,0
	PLTK1	-	0 a 0,98	0,1
	PLTK4	-	0 a 0,98	0,1
ZOO1	TZMAX	l/dia	-	0,47
	TZMORT	l/dia	-	0,01
	ZEFFIC	AA/AC	-	0,81
	PREF1	-	-	0,2
	PREF2	-	-	0,2
	PREF3	-	-	0,2
	PREF4	-	-	0,4
	TZRESP	l/dia	-	0,1
	ZOOMIN	g/m ³	0,1	0,1
ZOO2	ZS2P	mg/l	-	1,6
	ZOOT1	°C	-	2,0
	ZOOT2	°C	-	15,0
	ZOOT3	°C	-	18,0
	ZOOT4	°C	-	33,0
	ZOOK1	-	0 a 0,98	0,1
	ZOOK4	-	0 a 0,98	0,1
DET1	TDSETL	m/dia	0,05 a 1,0	0,22
	DETT1	°C	-	0
	DETT2	°C	-	30,0
	DETK1	-	0,1	0,1
FISH2	FISH1T1	°C	-	0,0
	FISH1T2	°C	-	30,0
	FISH1T3	°C	-	32,0

continua

continuação

Grupo	Taxa/Coef.	Unidade	Faixa de Uso	Valor Adotado
FISH2	FISH1T4	°C	-	37,1
	FISH1K1	-	0 a 0,98	0,1
	FISH1K4	-	0 a 0,98	0,1
	FEFFIC	-	-	0,95
	TFMORT	1/dia	0,001	0,001
	TFRESP	1/dia	-	0,001
DECAY1	TDOMDK	1/dia	-	0,24
	TRFRDK	1/dia	-	0,64
	TDOMRF	1/dia	0,01 a 0,1	0,05
	TNH3DK	1/dia	-	0,001
	TDETDK	1/dia	-	0,001
	TCOLDK	1/dia	-	0,048
	TSEDDK	1/dia	-	0,035
	TNO3DK	1/dia	0,05	0,05
DECAY2	DOMT1	°C	-	0
	DOMT2	°C	-	25,0
	DOMK1	-	0,1	0,1
DECAY3	NH3T1	°C	-	5,0
	NH3T2	°C	-	30,0
	NH3K1	-	0,1	0,1
DECAY4	NO3T1	°C	0	0
	NO3T2	°C	25,0	25,0
	NO3K1	-	0,1	0,1
SSETL	TSSETL	m/dia	0,86 a 860	0,86
	ADSRBP	m ³ /g	-	1,2
	ADSRBN	m ³ /g	-	125,0
	ADMAXP	gP*m ⁻³ / g _{sólido} *m ⁻³	-	0,007
	ADMAXN	gN*m ⁻³ / g _{sólido} *m ⁻³	-	0,005

continua

conclusão

Grupo	Taxa/Coef.	Unidade	Faixa de Uso	Valor Adotado
TMP	Q10COL	l/dia	1,04	1,04
CHEM	O2NH3	-	4,57	4,57
	O2DET	-	1,4	1,4
	O2RESP	-	1,1	1,1
	O2FAC	-	1,4	1,4
	O2DOM	-	1,4	1,4
	O2MN2	-	0,15	0,15
	O2FE2	-	0,14	0,14
	O2S2	-	2,0	2,0
ANAER1	OXYLIM	mg/ℓ	0,5	0,5
	SEDTHK	cm	-	5,0
ANAER2	TMN4ST	m/dia	0,1	0,1
	TMN4RE	l/dia	0,002 a 0,16	0,008
	TMNREL	g/m ² *dia	0,1 a 0,5	0,3
	TMN2OX	l/dia	≥0,35	0,35
ANAER3	TFE3ST	l/dia	0,05	0,05
	TFE3RE	l/dia	0,03	0,03
	TFEREL	g/m ² *dia	0,3	0,3
	TFE2OX	l/dia	0,6	0,6
	TFESAD	l/dia	0,4	0,4
	TFESST	m/dia	≥0,5	0,5
	TFESBD	l/dia	0,6	0,6
ANAER4	TSO4RE	l/dia	≥0,04	0,04
	TSREL	g/m ² *dia	≥0,1	0,1
	TS2OXI	l/dia	≥0,5	0,5
	TS2DK	l/dia	≥0,05	0,05
	TXP4RE	g/m ² *dia	≥0,3	0,3
	TCNREL	g/m ² *dia	≥0,4	0,4

Parte das taxas citadas, com relação a peixes, foi referenciada em algumas das espécies existentes na Represa Jaguari-Jacareí, tais como o Blackbass e a Carpa. As demais taxas e coeficientes referentes a macrófitas, zooplâncton, fitoplâncton etc. foram referenciadas em algumas espécies identificadas na Represa Jaguari-Jacareí entre os anos de 1997 e 1999 sendo citadas no manual do CE-QUAL-R1, tais como: *Melosira* sp., *Rhizosolenia* sp., *Chrorella* sp., *Anabaena* sp., *Microcystis* sp., *Cyclotella* sp., *Scenedesmus* sp., *Daphnia* sp.

Entretanto, nem sempre a espécie escolhida para a simulação tinha seus valores representados nos vários coeficientes e taxas do modelo, nem mesmo em literaturas mais recentes, tal como em Jørgensen et al. (1996) onde, apesar de reunir em um único volume os resultados de inúmeras pesquisas mundiais incluindo as citadas no manual do CE-QUAL-R1 de décadas anteriores, os coeficientes e taxas para ambientes tropicais são de rara ocorrência. Dessa forma, uma análise dos resultados, tanto na fase de CALIBRAÇÃO como na de SIMULAÇÃO do modelo, foi prejudicada.

6.6 As Simulações do CE-QUAL-R1 e do ACQUANET

Em virtude da disponibilidade parcial de dados de qualidade disponíveis para as simulações com o CE-QUAL-R1, adotou-se a *temperatura ao longo da coluna d'água* como *parâmetro de referência* a ser usado tanto na fase de CALIBRAÇÃO como na fase de SIMULAÇÃO com os cenários do ACQUANET.

6.6.1 Calibração de Parâmetros Físicos do CE-QUAL-R1

De acordo com Porto (1991):

“A calibração é o processo de ajuste dos parâmetros dos modelos de simulação. Este ajuste é feito mediante alteração dos parâmetros do modelo até que se consiga uma aderência razoável entre os valores observados no campo e os valores calculados pelo modelo”.

Para a calibração dos parâmetros físicos do modelo CE-QUAL-R1 adotou-se o seguinte procedimento:

- escolha do ponto de amostragem JC-101 da Represa Jacareí, situado próximo ao corpo da barragem do rio Jacareí, como referência de dados observados em campo a ser usada na CALIBRAÇÃO;
- início das simulações no primeiro dia disponível de dados de qualidade observados na represa de estudo (30/05/1990);
- escolha do horizonte de cinco anos (30/05/1990 a 31/12/1994) a serem simulados para comparação com os valores observados (calibração) a fim de se definir os parâmetros e/ou faixa de atendimento dos parâmetros e as conseqüências de suas alterações face aos perfis observados;
- escolha do mesmo horizonte para nova simulação, agora em período subsequente ao da calibração a partir do primeiro dia disponível de dados de qualidade da represa-de-estudo (19/04/1995 a 31/12/1999), com os parâmetros físicos pré-definidos na fase de calibração para avaliar se ocorre boa aderência dos perfis simulados com os perfis observados no período (validação).

Não sendo possível desenvolver um procedimento de calibração automática, tal como o desenvolvido por Porto (1991), procedeu-se à calibração e análise de sensibilidade com auxílio dos gráficos de pontos observados e de pontos simulados, avaliando-se visualmente

nos gráficos a condição de aderência entre as curvas simuladas e as observadas. Tal dificuldade ocorreu em função do grande número de variáveis a serem ajustadas para a calibração, conforme descrito nas tabelas 6.3 e 6.4. e da impossibilidade de se desenvolver a tempo uma rotina de calibração.

Os parâmetros apontados no manual do CE-QUAL-R1 estão descritos na Tabela 6.7 a seguir:

Tabela 6.7 - Parâmetros Físicos do CE-QUAL-R1 apontados no manual do modelo

Parâmetro Físico de Qualidade	Unidade	Sigla no Modelo	Mínimo Manual	Máximo Manual	Recom. Manual
Fração da Área da Superfície da Água Exposta à Ação do Vento	-	SHELCF	0,0	1,0	-
Fração de Convecção Penetrativa do Vento	-	PEFRAC	0,1	0,5	0,3
Coefficiente de Difusão Devido ao Vento	m ² /s	CDIFW	1,0E-05	1,0E-04	-
Coefficiente de Difusão Devido à Advecção	m ² /s	CDIFF	1,0E-06	1,0E-05	-
Densidade Crítica Para Alocar as Águas de Influxo	kg/m ³	CDENS	0,01	2,00	0,1
Coefficiente de Atenuação de Radiação Solar devido à Dispersão e Absorção da M.O. em Decomposição na Coluna D'água	-	TURB	0,00	0,13	0,06
Coefficiente Empírico na Função de Vento para Fluxos de Evaporação e Fluxo de Calor Convectivo	m/mb-sec	AA	0,00	4,18E-09	-
Coefficiente Empírico na Função de Vento para Fluxos de Evaporação e Fluxo de Calor Convectivo	mb ⁻¹	BB	0,00	1,51E-09	-
Coefficiente de Extinção de Luz	m ⁻¹	EXCO	0,03	4,00	-
Fração de Radiação Solar Absorvida em 0,6m de Profundidade	-	SURFRAC	0,0	1,0	-
Coefficiente de Meia-Saturação para Sólidos em Suspensão	1/m*mg/l	EXTINS	-	-	-

Os parâmetros testados e os adotados no CE-QUAL-R1 estão descritos na Tabela 6.8 a seguir:

Tabela 6.8 - Parâmetros Físicos do CE-QUAL-R1 testados/adotados na Represa Jaguari-Jacareí

Parâmetro Físico de Qualidade	Unidade	Sigla no Modelo	Mínimo Recom.	Máximo Recom.	Valor Adotado
Fração da Área da Superfície da Água Exposta à Ação do Vento	-	SHELCF	0,8	1,0	1,0
Fração de Convecção Penetrativa do Vento	-	PEFRAC	0,25	0,35	0,3
Coefficiente de Difusão Devido ao Vento	m ² /s	CDIFW	1,0E-05	1,0E-04	1,0E-05
Coefficiente de Difusão Devido à Advecção	m ² /s	CDIFF	1,0E-06	1,0E-05	1,0E-06
Densidade Crítica Para Alocar as Águas de Influxo	kg/m ³	CDENS	0,05	2,0	0,1
Coefficiente de Atenuação de Radiação Solar devido à Dispersão e Absorção da M.O. em Decomposição na Coluna D'água	-	TURB	>0,65	1,00	0,8
Coefficiente Empírico na Função de Vento para Fluxos de Evaporação e Fluxo de Calor Convectivo	m/mb-sec	AA	2,00E-09	3,00E-09	2,83E-09
Coefficiente Empírico na Função de Vento para Fluxos de Evaporação e Fluxo de Calor Convectivo	mb ⁻¹	BB	2,50E-10	4,50E-10	2,50E-10
Coefficiente de Extinção de Luz	m ⁻¹	EXCO	0,1	1,00	0,3
Fração de Radiação Solar Absorvida em 0,6m de Profundidade	-	SURFRAC	0,1	1,0	0,3
Coefficiente de Meia-Saturação para Sólidos em Suspensão	1/m*mg/l	EXTINS	0,001	0,1	0,01

6.6.2 Análise das simulações com o CE-QUAL-R1 (calibração)

As simulações dos cerca de cem cenários efetuadas para a fase de CALIBRAÇÃO do CE-QUAL-R1 possibilitaram analisar quais parâmetros têm maior influência sobre a resposta do modelo e relação ao perfil térmico.

A análise de sensibilidade apresentada na Tabela 6.9 obedeceu ao seguinte critério:

- **pouco influente (★)**: as alterações efetuadas entre os valores máximos e mínimos recomendados pelo manual do modelo ou adotados nas simulações *têm pouco ou nenhum efeito significativo no perfil de temperatura resultante*;
- **mediamente influente (★★)**: as alterações efetuadas entre os valores máximos e mínimos recomendados pelo manual do modelo ou adotados nas simulações *têm efeito razoável no perfil de temperatura resultante*;
- **muito influente (★★★)**: as alterações efetuadas entre os valores máximos e mínimos recomendados pelo manual do modelo ou adotados nas simulações *é muito significativo para o perfil de temperatura resultante*.

Tabela 6.9 - Análise de Sensibilidade dos Parâmetros Físicos do CE-QUAL-R1

Parâmetro Físico de Qualidade	Sigla Par. Modelo	NÍVEL DE IMPORTÂNCIA
Fração da Área da Superfície da Água Exposta à Ação do Vento	SHELCF	★ ★
Fração de Convecção Penetrativa do Vento	PEFRAC	★ ★
Coefficiente de Difusão Devido ao Vento	CDIFW	★ ★
Coefficiente de Difusão Devido à Advecção	CDIFF	★ ★
Densidade Crítica Para Alocar as Águas de Influxo	CDENS	★
Coefficiente de Atenuação de Radiação Solar devido à Dispersão e Absorção da M.O. em Decomposição na Coluna D'água	TURB	★ ★ ★
Coefficiente Empírico na Função de Vento para Fluxos de Evaporação e Fluxo de Calor Convectivo	AA	★ ★
Coefficiente Empírico na Função de Vento para Fluxos de Evaporação e Fluxo de Calor Convectivo	BB	★ ★ ★
Coefficiente de Extinção de Luz	EXCO	★ ★ ★
Fração de Radiação Solar Absorvida em 0,6m de Profundidade	SURFRAC	★ ★ ★
Coefficiente de Meia-Saturação para Sólidos em Suspensão	EXTINS	★

6.6.3 Resultados das simulações com o CE-QUAL-R1 (calibração & validação)

Os gráficos a seguir ilustram a fase de calibração do modelo CE-QUAL-R1 realizada com os dados de entrada (qualidade e qualidade) dos tributários comparando-os com os perfis de temperatura observados da Represa Jaguari-Jacareí, especificamente no ponto de amostragem JC-101, localizado próximo ao corpo da barragem. A calibração foi dividida em 4 fases:

- fase 01: simulação do CE-QUAL-R1 com os coeficientes físicos de calibração adotados para o período de 30/05/1990 a 31/12/1994, analisando a aderência dos valores “simulados X observados” (calibração);

- fase 02: simulação do CE-QUAL-R1 com os mesmos coeficientes adotados na fase 01 para o período de 19/04/1995 a 31/12/1999, checando aderência de valores “simulados X observados” (calibração/verificação);
- fase 03: simulação do CE-QUAL-R1 com os mesmos coeficientes adotados nas fases 01 e 02, agora para o período de 30/05/1990 a 31/12/1999 (verificação/validação);
- fase 04: teste com os mesmos coeficientes adotados nas fases anteriores para o período de 21/07/1993 a 31/12/1999 (verificação/validação).

A escolha das datas de início das simulações das fases de calibração foi feita com base na quantidade de dados disponíveis, servindo como perfis de qualidade iniciais da represa em estudo para acionamento do modelo CE-QUAL-R1.

Os resultados das fases 01 e 02 estão nos gráficos das Figuras 6.5 a 6.10, a seguir, onde são plotados os valores de temperatura simulados e valores de temperatura observados:

Figura 6.5 - Calibração do CE-QUAL-R1 entre 23/10/90 e 23/01/92 (Temperatura - fase 01)

Figura 6.6 - Calibração do CE-QUAL-R1 entre 23/03/92 e 12/05/93 (Temperatura - fase 01)

Figura 6.7 - Calibração do CE-QUAL-R1 entre 25/05/93 e 15/12/93 (Temperatura - fase 01)

Figura 6.8 - Calibração do CE-QUAL-R1 entre 16/02/94 e 27/12/94 (Temperatura - fase 01)

Figura 6.9 - Calibração do CE-QUAL-R1 entre 14/04/95 e 13/08/97 (Temperatura - fase 02)

Figura 6.10 - Calibração do CE-QUAL-R1 entre 28/08/97 e 18/10/99 (Temperatura - fase 02)

Os gráficos a seguir comparam as fases 03, 04 (93 a 94) e fases 02, 03, 04 (95 a 99).

Figura 6.11 - Calibração do CE-QUAL-R1 – comparação das fases 03, 04 (1993 a 1994)

Figura 6.12 - Calibração do CE-QUAL-R1 – comparação das fases 02, 03 e 04 (1995 e 1996)

Figura 6.13 - Calibração do CE-QUAL-R1 – comparação das fases 02, 03 e 04 (1997 a 1999)

6.6.4 CONCLUSÕES PRELIMINARES – Calibração do CE-QUAL-R1

Os principais fatores que influenciaram a calibração dos parâmetros físicos do CE-QUAL-R1 foram:

- a maioria dos dados qualidade de entrada, incluindo temperatura da água, fosfato, série nitrogenada, pH, ferro, manganês dos tributários da represa, foi gerada a partir de uma quantidade pequena de dados, ajustando-se diversas curvas possibilitando a obtenção de dados diários, talvez não tão próximos da realidade;
- apesar da represa em estudo ser formada pelo barramento de dois rios, o fluxo de água, em grande parte do ano é oposto ao fluxo de entrada, ou seja, grande parte da vazão afluente, proveniente do rio Jaguari, não é liberada para jusante e sim para montante através da tomada d'água seletiva do Túnel 7, situada mais próxima da foz do rio Jacaréi, na entrada do espelho d'água. Dessa forma, grande parte do fluxo segue no sentido barragem→foz, uma especificidade não contemplada pelo CE-QUAL-R1. Segundo o manual, o modelo possibilita uma melhor simulação de retiradas próximas ao barramento;
- a contribuição natural calculada pela eq. (6.11), em muitas datas da série, foi inferior à vazão do posto F-25B. Nesses casos, a vazão afluente considerada para a represa foi a do posto. Como o posto F-25B (rio Jaguari) representa cerca de 90 % a 95 % da contribuição média da represa, então os efeitos de evaporação estariam totalmente incorporados, mas o remanescente, referente ao rio Jacaréi, não foi diretamente considerado, já que não existe posto fluviométrico naquele rio. Além disso, a vazão do posto F-25B é lida apenas uma vez ao dia, não havendo possibilidade de obtenção de uma vazão média diária, como calculado na eq. (6.11). Por esses fatores, os valores de evaporação calculados na estação M1 foram usados para obtenção da vazão diária afluente somente no período em que não

- houve leitura do posto F-25B (entre 01/01/90 e 31/08/90). Portanto, em parte da série, alguns perfis simulados, apresentaram profundidades diferentes das observadas;
- a precisão de resposta do CE-QUAL-R1 em relação ao *nível d'água simulado* é de 0,10 m enquanto o nível d'água real lido tem precisão de 0,01 m. Acumulando-se esse erro ao longo dos anos de simulação, além do problema de obtenção da vazão natural real, nota-se variação de nível com cerca de até $\pm 1,50$ m no perfil simulado;
 - as vazões transferidas pelo Túnel 7 são obtidas com base em curvas teóricas de descarga, não sendo realmente medidas através, por exemplo, de postos fluviométricos, o que pode incorrer em erro na obtenção da vazão real transferida;
 - para utilização do CE-QUAL-R1 a equação cota-volume original da represa Jaguari-Jacareí, descrita na eq.(6.18) de grau 4 foi convertida na eq.(6.19) de grau 3, simplificação esta que, juntamente com o arredondamento obrigatório de seus coeficientes e não podendo ultrapassar 8 caracteres no arquivo de entrada, incorreram em alteração dos volumes resultantes;
 - os dados de entrada do CE-QUAL-R1 abrangem as dimensões das estruturas de retirada de água. Sendo as mesmas fornecidas anualmente através do arquivo de entrada do modelo (construído pela INTERFACE) previu-se a abertura máxima das comportas da tomada seletiva quando estas fossem utilizadas, independentemente da vazão de saída real, ou seja, para vazão de 0,01 m³/s ou 20,00 m³/s o modelo considera a comporta totalmente aberta. Ocorre, porém, que em situação real, as comportas são operadas parcialmente abertas de forma que a vazão de saída seja liberada por cima da comporta, semelhante a um vertedor normal de soleira delgada, situação que somente seria possível se o intervalo de simulação (anual para o estudo) fosse menor;
 - os coeficientes, taxas e índices físicos, químicos e biológicos (parâmetros de qualidade) do modelo CE-QUAL-R1, usados nos arquivos de entrada para uso do modelo, foram

adotados como valores constantes ao longo de todos os anos simulados, tanto na fase de CALIBRAÇÃO como na de SIMULAÇÃO. Dessa forma, não foi considerada uma eventual dinâmica desses valores ao longo dos meses ou anos de simulação, passíveis de ocorrerem em função das variáveis de entrada, notadamente dos cursos d'água afluentes, o que implicaria em alteração do código da INTERFACE e necessidade de se analisar inúmeros cenários.

Foi verificado que a influência dos parâmetros físicos calibráveis não estava limitada somente ao perfil de temperatura da coluna, mas também aos demais parâmetros, como o oxigênio dissolvido, que até certas profundidades, apresenta valores maiores que zero em função da fração de radiação solar absorvida nos primeiros 60 cm e, valores de fração de radiação próximos de 1,00, impedem a penetração de luz abaixo de 0,60 m de profundidade e conseqüentemente, o processo de fotossíntese, resultando em baixa ou nenhuma produção de oxigênio, causando anoxia em certas profundidades.

Apesar desses problemas, os parâmetros físicos adotados nas fases de calibração do CE-QUAL-R1 apresentaram ajuste razoável. Além disso, constatou-se que o perfil de partida da represa influencia os primeiros meses de simulação (Figura 6.5); tal influência diminui nos anos simulados subseqüentes (Figuras 6.5 a 6.7). Os demais dados de qualidade simulados na fase de calibração do CE-QUAL-R1 podem ser vistos, sem ajuste, no Anexo B.

As simulações efetuadas para a fase de CALIBRAÇÃO indicam um melhor desempenho do modelo CE-QUAL-R1 para as os meses mais quentes em profundidades superiores a 6,0 m, como citado no manual. Os meses mais frios, entretanto, apresentam tendência semelhante aos perfis observados.

Nota-se que é possível ajustar os parâmetros físicos do modelo, “calibrando-os”, em função do ponto de amostragem analisado, principalmente se a represa de estudo apresentar diversos pontos de controle de qualidade. Em outras palavras, pode-se *ajustar* os parâmetros do modelo para resposta em função do ponto de amostragem considerado.

Na represa de estudo, entretanto, foi constatado que não há diferença considerável entre os valores de temperatura do ponto de amostragem de referência (JC-101) e do ponto de amostragem situado próximo da estrutura de retirada do Túnel 7 (JC-107). Nota-se que, apesar da diferença das características físicas, analisando-se separadamente a represa de estudo, isto é, analisando-se isoladamente Jaguari e depois Jacareí, onde a vazão natural média é menor que em Jaguari e onde o tempo de residência é maior, os resultados das simulações com o CE-QUAL-R1 também apresentaram razoável aderência no perfil térmico do ponto de amostragem da represa Jaguari (JA-101).

6.6.5 As Simulações do CE-QUAL-R1 com cenários do ACQUANET

Os cenários do ACQUANET usados na de SIMULAÇÃO do CE-QUAL-R1 têm como características principais: o horizonte de simulação - **02 (dois) anos** consecutivos e; o tipo de simulação - **Planejamento Tático**. As demais características dos estão descritas nas Tabelas 6.10 e 6.11 seguintes:

Tabela 6.10 - Características Comuns nos Cenários Simulados pelo ACQUANET⁵⁵

Nó (Node)	Tipo: Nó/ (Link)	Prior.-P Custo.-C	Meta Fração / Vazão	Período	Capac. Máx. <u>Operacional</u>	Capac. Mín. <u>Operacional</u>
Ag_Claras (Águas Claras)	Nó: Represa	P:15	0,9	Jan a Dez	0,62 Mm³	0,00 Mm³
Rep_Atib (Atibainha)	Nó: Represa	P:20	0,87 0,94 1,00	Dez a Fev Mar Abr a Nov	100,16 Mm³	0,00 Mm³
Rep_Cac (Cachoeira)	Nó: Represa	P:20	0,66 0,83 1,00	Dez a Fev Mar Abr a Nov	70,55 Mm³	0,00 Mm³
Rep_Jag_Jac (Represa Jaguari-Jacareí)	Nó: Represa	P: 20	0,81 0,90 1,00	Dez a Fev Mar Abr a Nov	595,04 Mm³	0,00 Mm³
Rep_Pva_Ctro	Nó: Represa	P: 10	0,56 0,77 1,00	Dez a Fev Mar Abr a Nov	9,44 Mm³	4,00 Mm³
ETA_Guarau	Nó: Demanda	P: 7	33,0 m³/s	Jan a Dez	-	-
Jus_Atib	Nó: Demanda	P: 5	1,0 m³/s	Jan a Dez	-	-
Jus_Cac	Nó: Demanda	P: 5	2,0 m³/s	Jan a Dez	-	-
Jus_Jag	Nó: Demanda	P: 5	2,0 m³/s	Jan a Dez	-	-
Jus_P_Castro	Nó: Demanda	P: 5	1,0 m³/s	Jan a Dez	-	-
Paulínia	Nó: Demanda	P: 3	15,0 m³/s	Jan a dez	-	-
Piracicaba	Nó: Demanda	P: 3	40,0 m³/s	Jan a Dez	-	-
T-7(Túnel 7-tomada sel.)	Elo (Link)	C: 0	-	-	30,0 m³/s	0,2 m³/s
T-6	Elo (Link)	C: 0	-	-	35,0 m³/s	0,2 m³/s
T-5	Elo (Link)	C: 0	-	-	35,0 m³/s	0,0 m³/s
L5-5 (Jusante Jag-Jac)	Elo (Link)	C: 0	-	-	1000,0 m³/s	0,0 m³/s
L6-6 (Jusante Cachoeira)	Elo (Link)	C: 0	-	-	1000,0 m³/s	0,0 m³/s
L7-7 (Jusante Atibainha)	Elo (Link)	C: 0	-	-	1000,0 m³/s	0,0 m³/s
L8-8 (Jusante P_Castro)	Elo (Link)	C: 0	-	-	1000,0 m³/s	0,0 m³/s
adut_ESI	Elo (Link)	C: 0	-	-	33,0 m³/s	0,0 m³/s
ag_cl-Guarau	Elo (Link)	C: 0	-	-	40,0 m³/s	0,0 m³/s

⁵⁵ Parte dos valores foi obtida das simulações efetuadas pela Sabesp, parte foi obtida de Castro (2003). Demais valores foram obtidos do Data Oper do Sistema (GESP/SES/SABESP, 1989).

Tabela 6.11 - Características Específicas nos Cenários do ACQUANET incluindo Volumes Operacionais Iniciais

CENÁRIO / Característica	cant_jan.mdb	cant_abr.mdb	cant_jul.mdb	cant_out.mdb
Vol. Ini.: Ág_Claras	0,53 Mm ³ (85 %)	0,56 Mm ³ (90 %)	0,56 Mm ³ (90 %)	0,56 Mm ³ (90 %)
Vol. Ini.: Rep_Atib	62,10 Mm ³ (60%)	70,11 Mm ³ (70%)	70,11 Mm ³ (70%)	50,08 Mm ³ (50%)
Vol. Ini.: Rep_Cac	31,75 Mm ³ (45 %)	42,33 Mm ³ (60 %)	38,80 Mm ³ (55 %)	28,22 Mm ³ (40 %)
Vol.Ini.:Rep_Jag_Jac	238,02 Mm³ (40 %)	178,51 Mm³ (20 %)	59,50 Mm³ (10 %)	178,51 Mm³ (30 %)
Vol.Ini.:Rep_Pva_Ctro	5,67 Mm ³ (60 %)	6,61 Mm ³ (70 %)	6,14 Mm ³ (65 %)	5,67 Mm ³ (60 %)
Mês/Ano de Início	Jan/1930	Abr/1930	Jul/1930	Out/1930
Mês/Ano Final	Dez/1999	Mar/2000	Jun/2000	Set/2000

Os volumes iniciais e as capacidades operacionais de armazenamento foram estabelecidos com base na série histórica da Sabesp, considerando-se os níveis mínimo e máximo operacionais da Represa Jaguari-Jacareí, respectivamente, as cotas altimétricas 829,00 m e 844,00 m com volume mínimo operacional de 0,00 Mm³ (0 %) e máximo operacional de 595,04 Mm³ (57,4 %), o que corresponde a um volume mínimo total de 442,31 Mm³ (42,6 %) e volume máximo total 1037,35 Mm³ (100 %).

Apesar da capacidade de adução de 35,00 m³/s do Túnel 7, adotou-se nas simulações a capacidade máxima de captação na tomada seletiva de 30,00 m³/s, conforme especificado em seu manual de operação (SABESP/THEMAG, 1986).

Devido ao intervalo de dados disponíveis de qualidade ser diferente dos dados de quantidade, optou-se por reduzir os meses de início e de fim dos cenários do ACQUANET para leitura e simulação pelo CE-QUAL-R1 através da INTERFACE, conforme Tabela 6.12 a seguir:

Tabela 6.12 - Características dos Cenários do ACQUANET simulados no CE-QUAL-R1

CENÁRIO / Característica	cant_jan.mdb	cant_abr.mdb	cant_jul.mdb	cant_out.mdb
Volume Inicial Oper.: Rep_Jag_Jac	238,02 Mm³ (40 %)	476,03 Mm³ (80 %)	357,02 Mm³ (60 %)	119,01 Mm³ (20 %)
Volume Inicial Total: Rep_Jag_Jac	680,33 Mm³ (66 %)	918,34 Mm³ (89 %)	799,33 Mm³ (77 %)	561,32 Mm³ (54 %)
Mês/Ano de Início	Jan/1990	Abr/1990	Jul/1990	Out/1990
Mês/Ano Final	Dez/1999	Mar/1999	Jun/1999	Set/1999
Número de Rodadas	9	8	8	8
Perfil Inic. Qualidade	23/01/92	19/04/95	21/07/93	22/10/92

O cenário com início em janeiro contém, portanto, para o CE-QUAL-R1 um total de 9 rodadas, com 24 meses simulados em cada uma, tendo a simulação terminada no mês de dezembro do segundo ano. Ou seja, a rodada com simulação iniciando-se em jan/1990 termina em dez/1991. Os demais cenários têm um total de 8 rodadas, também com **24 meses simulados**, abrangendo porém 3 anos consecutivos em cada rodada, ou seja, o cenário com início em abril/1990 tem a simulação no CE-QUAL-R1 terminada em março/1992, e assim sucessivamente.

Todos os cenários para o Sistema Cantareira no ACQUANET foram simulados em três diferentes situações no CE-QUAL-R1, quanto às retiradas de águas nos três níveis existentes na tomada seletiva do túnel 7 da Represa Jaguari-Jacareí, a fim de se avaliar as possíveis alterações no perfil de qualidade da coluna d'água, a saber:

- **Situação 01:** retirada de água **apenas no nível de superfície**, variando entre os três possíveis níveis, conforme elevação do nível d'água. Neste caso, é a situação mais próxima da real operação da represa, na qual permite abertura de no máximo um nível de comporta, em

função da carga hidráulica máxima de 11,00 m.c.a. recomendada para a operação⁵⁶ de cada comporta;

- **Situação 02**: retirada de água com **abertura de todas as comportas**, independentemente da carga hidráulica das comportas e desde que haja nível d'água suficiente para abertura. Neste caso, as “vazões ótimas” do Túnel 7, resultantes do ACQUANET, foram divididas por igual entre todas as comportas;

- **Situação 03**: retirada de água **apenas no nível de fundo**, independente da carga hidráulica das comportas.

Nas três situações, a comporta do vertedor, situado na barragem Jacareí, foi utilizada somente quando a vazão de jusante, liberada pelas válvulas dispersoras (descarga de fundo) de ambas as barragens, ultrapassou a vazão máxima de 36,00m³/s.

A fim de se padronizar os resultados de quantidade de água simulados pelo ACQUANET e de qualidade de água simulados pelo CE-QUAL-R1, os mesmos serão apresentados através da *mediana* dos valores obtidos.

6.6.5.1 Resultados das Simulações do ACQUANET

A fim de se uniformizar os resultados de qualidade e quantidade, os mesmos são apresentados a seguir na forma de *mediana*. Os cenários do ACQUANET usados no CE-QUAL-R1 apresentaram os seguintes resultados, para os elos e demandas de interesse:

⁵⁶ Apesar dessa recomendação, as comportas foram projetadas para operar com até 27,00 m.c.a. (SABESP/THEMAG, 1996).

Figura 6.14 - Vazões resultantes do ACQUANET para o Túnel 7 e para jusante da Represa Jaguari-Jacaré (Qdes+Qvert), para os cenários *cant_jan*, *cant_abr*, *cant_jul* e *cant_out* (respectivamente) com garantia ou permanência de 50 %

Em 50 % do tempo no Túnel 7 (tomada seletiva) as *vazões ótimas* resultantes do ACQUANET, dentro dos limites mínimo e máximo estabelecidos previamente (0,20 m³/s e 30,00 m³/s), foram maiores ou iguais às *vazões mensais* plotadas nos gráficos da Figura 6.14. As vazões vertidas e descarregadas, representadas pelo arco L5-5 (Qdes+Qvert) tiveram pouca variação, permanecendo em torno dos 2,00 m³/s em grande parte do tempo, com exceção do cenário iniciado em abril, cuja soma das vazões descarregadas e vertidas foi maior ou igual a aproximadamente 12,5 m³/s em 50 % do tempo no mês de fevereiro do ano 1 e, maior ou igual a aproximadamente 4,5 m³/s, no mês de fevereiro do ano 2 (Figura 6.14).

Os volumes finais simulados pelo ACQUANET estão apresentados na Figura 6.15 a seguir:

Figura 6.15 - Volumes finais simulados na Represa Jaguari-Jacaré para os cenários cant_jan, cant_abr, cant_jul e cant_out (respectivamente) com garantia ou permanência de 50 %

Em 50 % do tempo na Represa Jaguari-Jacaré os *volumes finais* resultantes do ACQUANET, dentro dos limites máximo e mínimo estabelecidos previamente (595,04 Mm³ e 0,00 Mm³) foram maiores ou iguais aos *volumes mensais* plotados nos gráficos da Figura 6.15, havendo grande variação durante os 24 meses de simulação. Foi verificado que, em alguns meses de algumas rodadas, foram atingidos os níveis máximo e mínimo de armazenamento

6.6.5.2 Perfis de temperatura - simulação do CE-QUAL-R1 com cenário “cant_jan.mdb” do ACQUANET - início em JANEIRO (Situações 01, 02 e 03)

Algumas das *medianas* resultantes dos perfis mensais estão ilustradas a seguir:

Figura 6.16 - Perfis de Temperatura – Situações 01, 02 e 03 (maio, agosto, novembro-1º ano)

Figura 6.17 - Perfis de Temperatura – Situações 01, 02 e 03 (abril, junho, dezembro-2º ano)

6.6.5.3 Perfis de temperatura - simulação do CE-QUAL-R1 com cenário “cant_abr.mdb” do ACQUANET - início em ABRIL (Situações 01, 02 e 03)

A seguir, algumas *medianas* resultantes dos perfis mensais de temperatura:

Figura 6.18 - Perfis de Temperatura – Situações 01, 02 e 03 (maio, outubro, fevereiro-1º ano)

Figura 6.19 - Perfis de Temperatura – Situações 01, 02 e 03 (junho, setembro, dezembro -2º ano)

6.6.5.4 Perfis de temperatura - simulação do CE-QUAL-R1 com cenário “cant_jul.mdb” do ACQUANET - início em JULHO (Situações 01, 02 e 03)

A seguir, algumas *medianas* resultantes dos perfis mensais de temperatura:

Figura 6.20 - Perfis de Temperatura – Situações 01, 02 e 03 (julho, outubro, fevereiro - 1º ano)

Figura 6.21 - Perfis de Temperatura – Situações 01, 02 e 03 (agosto, dezembro, junho - 2º ano)

6.6.5.5 Perfis de temperatura - simulação do CE-QUAL-R1 com cenário “cant_out.mdb” do ACQUANET - início em OUTUBRO (Situações 01, 02 e 03)

A seguir, algumas *medianas* resultantes dos perfis mensais de temperatura:

Figura 6.22 - Perfis de Temperatura – Situações 01, 02 e 03 (dezembro, março, julho-1º ano)

Figura 6.23 - Perfis de Temperatura – Situações 01, 02 e 03 (dezembro, junho, setembro - 2ºano)

Os perfis de temperatura mostrados anteriormente (Figuras 6.16 a 6.23) na forma de medianas de resultados são lidos da seguinte forma: em 50 % do tempo as temperaturas médias da série, no respectivo mês analisado e em cada profundidade (a cada 1,0 m) de interesse, foram maiores ou iguais aos valores mostrados no gráfico.

Os valores de temperatura, principalmente em níveis mais profundos, que não acompanham a tendência do perfil (ago/a1 e nov/a1 da Figura 6.16, abr/a2 e jun/a2 da Figura 6.17, out/a1 e fev/a2 da Figura 6.18, out/a1 da Figura 6.20, ago/a2 e dez/a2 da Figura 6.21) ocorrem, pois os perfis diários de origem possuem profundidades diferentes ao longo do mês. Quando a curva de permanência é calculada, nota-se que a ordem dos valores difere entre a camada mais profunda, que tem menos dados, e as camadas média e superficial, que têm maior quantidade de dados. Outros valores fora da tendência ocorrem por arredondamento da sua profundidade.

Outro fato que interfere no perfil mediano é o valor de agrupamento dos valores simulados: cada simulação tem como resultado camadas de dados com espessuras e profundidades diferentes entre um dia e outro, ou seja, se em uma dia a camada superficial tem 0,7m, a camada superficial do dia seguinte, ou o mesmo dia no ano seguinte, poderá apresentar uma camada de 1,4m, dentro dos limites estabelecidos para contração e expansão da camada, porém não uniformizada para uma visualização gráfica simples.

É o que leva certos meses simulados a terem alguns valores “fora da tendência”, pois esses valores de profundidades diferentes foram agrupados metro a metro.

Em todas as simulações (Figuras 6.16 a 6.23), constatou-se que:

- os meses mais quentes (entre outubro e março) apresentaram estratificação térmica significativa com o epilímnio em cerca de 8,00m de profundidade, metalímnio entre 8,00m e 26,00m e hipolímnio aproximadamente abaixo de 26,00m. A variação máxima entre o epilímnio e o hipolímnio foi de cerca de 8°C;
- os meses mais frios (entre abril e setembro) apresentaram tendência à isoterminia da coluna d'água, mas não houve mistura total; nesses períodos ocorreu a formação de uma camada bem misturada somente nos primeiros 20,00m de profundidade aproximadamente e o gradiente no restante da coluna foi de aproximadamente -4°C em média até o fundo da represa.

Depreende-se dos perfis resultantes (Figuras 6.16 a 6.23) que a retirada de água em três diferentes níveis não interferiu significativamente na temperatura da coluna d'água. Além disso, ressalta-se que o perfil inicial de temperatura tem grande influência nos perfis mensais resultantes dos meses subsequentes, pelo menos nos dois primeiros anos de simulação.

7. CONCLUSÕES

Foi apresentada uma metodologia para utilização conjunta de dois modelos matemáticos, o ACQUANET e o CE-QUAL-R1, através do desenvolvimento de uma INTERFACE computacional. A principal vantagem da INTERFACE foi possibilitar a simulação de retirada de água em diversos níveis da coluna d'água e analisar seus impactos sobre o perfil de temperatura da água a partir das vazões resultantes do modelo de quantidade.

Apesar da dificuldade de se efetuar uma calibração automática para os parâmetros físicos do modelo CE-QUAL-R1, a calibração manual, feita com a simulação de diversos cenários, apresentou razoável aderência entre os valores observados e os simulados, pelo menos em relação ao perfil térmico da coluna d'água da represa estudada. A simulação dos demais parâmetros ficou prejudicada em função da qualidade dos dados de entrada e do grande número de variáveis químicas e biológicas a serem calibradas.

A necessidade ou a vontade de desenvolvimento ou aplicação de modelos matemáticos de quantidade de água, mas principalmente de modelos de qualidade de água, deve ser precedida de uma valorizada melhoria na qualidade dos parâmetros atualmente analisados, principalmente em relação ao número de variáveis disponíveis e periodicidade das amostras, enfatizando a aquisição mais freqüente (maior número de coletas), preferencialmente diária de todos os parâmetros: temperatura da água, oxigênio dissolvido, fósforo, série nitrogenada, pH, ferro solúvel e insolúvel, manganês solúvel e insolúvel, sólidos (totais, dissolvidos, em

suspensão) etc., tanto na coluna d'água como nos sedimentos. A rede de monitoramento de qualidade de água deve ser implementada tanto na represa que se deseja gerenciar como na bacia hidrográfica de jusante e de montante (bacia de contribuição), estendendo-a aos seus cursos d'água tributários. A rede deve funcionar de tal maneira que a possibilidade de falha, isto é de perda de valor de algum parâmetro, seja reduzida ao máximo. O investimento não deve ser restrito somente a uma rede de monitoramento; ele deve abranger também: equipamentos de coleta, como sondas automáticas multi-parâmetros e; o corpo técnico que opera os equipamentos, a rede de monitoramento e gerencia os dados gerados em laboratório. O corpo técnico poderá ser cada vez mais eficiente aumentando-se a participação de seus integrantes em cursos de especialização e aprimoramento profissional (mestrado, doutorado etc.).

O mesmo deve ser aplicado aos parâmetros meteorológicos, isto é, deve-se ampliar a rede de estações meteorológicas de forma a possibilitar a coleta de dados em diversos pontos da represa desejada, incluindo, temperaturas do ar, vento, cobertura de nuvens etc. A ampliação da rede meteorológica também dificulta a perda de alguma variável requerida para simulações em modelos de qualidade de água.

A precisão dos valores quantitativos deve ser melhorada de forma a possibilitar a medição de vazões afluentes e efluentes mais próximas de valores reais, com o menor intervalo de tempo possível, com ou sem tempo-real (utilização de sensores automáticos).

Diversos são os modelos matemáticos de quantidade e um universo ainda maior envolve a existência de diversos modelos de qualidade de água, seja em represas, lagoas, lagos, estuários ou em cursos d'água. As teorias, ou seja, as formulações para representar os

processos (modelos) qualitativos já foram escritas, tal como em Bowie et al. (1985) dentre outros e, esse universo de modelos, em parte, embasou-se nessas teorias bem como em pesquisas científicas específicas que puderam apontar quais coeficientes e parâmetros deveriam ser usados. Porém, grande parte dessas pesquisas foram feitas em ambientes de climas frios e temperados, cujos resultados, em parte, foram reunidos por Jørgensen et al. (1996), e não em climas tropicais como ocorre no ambiente brasileiro, o que reforça a necessidade de se intensificar a pesquisa na área limnológica brasileira.

Portanto, é recomendável investir não só no aprimoramento de redes de monitoramento dos parâmetros qualitativos e quantitativos, mas também no apoio às pesquisas limnológicas, necessárias para se conhecer a fundo os processos físicos, químicos e biológicos que se desenvolvem no ambiente aquático, a inter-relação entre os seres desse meio e, posteriormente, conhecer quais coeficientes, taxas, índices, temperaturas e tantos outros parâmetros poderão representar os fenômenos naturais existentes e assim prevê-los e gerenciá-los através da utilização de modelos matemáticos.

A modelagem ou o uso de modelos na forma de INTERFACES computacionais mostra-se imprescindível para a gestão dos recursos hídricos. Porém, seu uso será sempre qualitativo, podendo indicar algumas tendências com pouca ou nenhuma precisão, enquanto não existir uma boa rede de monitoramento de qualidade de água e enquanto não existir uma extensa série histórica de dados que possibilite o teste com diversos modelos matemáticos de qualidade de água a fim de se adotar aquele que melhor represente o sistema.

O modelo CE-QUAL-R1 mostrou-se aplicável à Represa Jaguari-Jacareí mas seus resultados poderiam ser melhores caso os parâmetros de entrada fossem mais precisos, isto é, mais

próximos da realidade e caso não fosse necessário o ajuste de diversas equações para geração de dados diários. As simulações efetuadas com diferentes níveis de retirada da tomada seletiva mostraram pouca sensibilidade nos resultados do perfil da represa em estudo, possivelmente devido à tomada seletiva estar situada aproximadamente acima da elevação média da represa, havendo, portanto, para as três situações (somente comportas de superfície abertas, todas as comportas abertas ou somente comportas de fundo abertas) a retirada de água sempre das camadas mais altas.

As tomadas d'água seletivas poderão ter maior efeito sobre a qualidade de água da represa em que estiverem instaladas caso a mesma possibilite retiradas desde o fundo, ou próximo do fundo do terreno, até a superfície d'água. É uma situação que demanda novos estudos, principalmente se a represa estiver em fase de projeto.

Recomenda-se que, no futuro, o modelo ACQUANET, que atualmente, roda em escala mensal, seja testado em escala diária, tal como o CE-QUAL-R1, a fim de se avaliar seus efeitos na qualidade de água de uma represa ou curso d'água.

Recomenda-se que os próximos passos desse trabalho envolvam a simulação de qualidade de água de represas em cascata, tais como as demais represas integrantes do Sistema Cantareira. Para tanto, além de um modelo aplicado a represas, como o CE-QUAL-R1, deverá ser incorporado outro modelo que possa simular, por exemplo, as transferências de água entre as represas, tais como o modelo QUAL2E ou CE-QUAL-RIV1.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALBANO, G. D.; PORTO, R. L. L. **Integração de Modelos Matemáticos de Quantidade e de Qualidade de Água – Proposta de Gerenciamento de Sistemas Produtores de Abastecimento Público**. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, XV, 2003, Curitiba. Anais... Curitiba, 2003. p.1- 21.

ANDREU, J. **The AQUATOOL System** Part 1. 21p. Espanha. Disponível em: <http://www.upv.es/aquatool/en/Software_D.htm>. Acesso em: 01 de maio 2004.

_____; CAPILLA, J.; SANCHIS, E. AQUATOOL, A generalized decision-support system for water-resources planning and operational management. **Journal of Hydrology**, Vol. 177, N° 4, p.269-291, 1996.

ANTENUCCI, J.; IMERITO, A. **The CWR Dynamic Reservoir Simulation Model (DYRESM): User Manual Code**. Centre for Water Research, University of Western Australia. Australia, 2003.

_____; _____. **The CWR Dynamic Reservoir Simulation Model (DYRESM): Science Manual Code**. Centre for Water Research, University of Western Australia. Australia, 2002.

ARAÚJO FILHO, M. C. **Modelagem Matemática no Gerenciamento da Qualidade de Água em Reservatórios: Uma Primeira Estimativa das Futuras Tendências na Qualidade da Água durante as Fases de Enchimento e Estabilização de Reservatórios Tropicais, O Caso da Usina Hidroelétrica de Porteira**. Janeiro, 1991. 231 p. Dissertação Mestrado - Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo, São Carlos.

ARHEIMER, B.; OLSSON, J. Integration and Coupling of Hydrological Models with Water Quality Models: Applications in Europe. Swedish Meteorological and hydrological Institute (SMHI). p. 52. Suécia Disponível em: <<http://www.wmo.ch/web/homs/projects/homs/k15502.pdf>>. Acesso em: 25 de novembro 2003.

AZEVEDO, L. G. T et al. Integration of Water Quantity and Quality in Strategic River Basin Planning. **Journal of Water Resources Planning and Management**, Vol. 126, No. 2, p.85-97. March/April, 2000.

BARROS, A. L. M. M. Plano Integrado de Aproveitamento e Controle dos Recursos hídricos das Bacias Alto Tietê, Piracicaba, e Baixada Santista. Estudos Hidrológicos. DT-HDP-104-11/95. **HIDROPLAN** (COPLASA, ETEP, FIGUEIRDEDO FERRAZ, HIDROCONSULT, MAUBERTEC). São Paulo. Novembro, 1995.

BARROS, M. T. L. <<http://www.fcth.br/public/cursos/phd5029/aulasistemas.PDF>> Brasil. Acesso em: 10 de agosto 2003.

BOULION, V. V.; HÅKANSON, L. A new general dynamic model to predict biomass and production of bacterioplankton in lakes. **Ecological Modelling**. Vol. 160, p. 91-114, 2003.

BOWIE, G. L. et al. **Rates, Constants and Kinetics Formulations in Surface Water Quality Modeling**. EPA/600/3-85/040. United States Environmental Protection Agency (EPA). Georgia, 1985.

BRAGADIN, G. L. et al. Agricultural non-point source nutrients loadings estimated by means of an extended version of AGNPS. The Bidente-Ronco case study – Part I. **Ingegneria Ambientale** 22: 455, 1993.

CALSIM: **Water Resources Simulation Model**. Manual, Draft Documentation, E.U.A., 2000. Disponível em <<http://modeling.water.ca.gov/hydro/model/CalsimModel.pdf>>. Acesso: em 01 de maio 2004.

CAMPBELL, S. G.; FLUG, M.; HANNA, R.B. **Evaluating Water Allocations For Drought Management** in Proceedings of the Second Federal Interagency Hydrologic Modeling Conference, Subcommittee on Hydrology of the Interagency Advisory Committee on Water Information. Las Vegas, 2002.

CAN, E.; HOUCK, M. Real-Time Reservoir Operations by Goal Programming. **Journal of Water Resources Planning and Management**. ASCE, Vol. 110, N°3, p.297-309, 1984.

CASTRO, H. L. **Avaliação da Disponibilidade Hídrica para Abastecimento Público da Região Metropolitana de São Paulo com o uso de um SSD - Sistema de Suporte a Decisões**. Novembro, 2003. 169 p. Dissertação Mestrado - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.

CENTRAL Valley Project Improvement Act, Supplement to the Draft Programmatic Environmental Impact Statement. Bureau of Reclamation, U.S. Department of Interior California: Sacramento. Junho, 1999.

CERCO, C. F.; COLE, T.; **User's Guide to the CE-QUAL-ICM Three-Dimensional Eutrophication Model**, Release Version 1.0, Technical Report EL-95-15, US Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS. 1995.

CHAU, K. W.; CHENG, C.; LI, C. W. Knowledge management system on flow and water quality modeling. **Expert Systems with Applications**. Vol. 22, No. 4, p.321-330, 2002.

CHEN, C. W.; ORLOB, G. T. **Ecologic Simulation for Aquatic Environments**. WRE-1-0500. Water Resources Engineers, Inc. California, 1972.

CLAUSEN, R. The Numerical solution of network problems using the out-of-kilter algorithm. Rand Corporation. RM-5456-PR. Santa Monica. California, 1968.

COLE, T. M.; WELLS, S. A. **CE-QUAL-W2: A two-dimensional. Laterally averaged, Hydrodynamic and Water Quality Model, Version 3.0**, Instruction Report EL-2000. U.S. Army Engineering and Reserch Development Center. Vicksburg, MS. 2000.

DAHL, M.; WILSON, D. **Modelling of Water Quality**. Karlstad University. SE 651-88. Technical report. Suécia. Setembro, 2000. 58p. Disponível em: <http://www.ee.kau.se/forskning/ModSim/mod_waterq.pdf>. Acesso em: 04 de junho 2003.

DAI, T. **River Basin Network Model With Integration of Water Quantity and Quality**. 1996. 234 p. Thesis for Degree of Master of Science. Department of Civil Engineering, Colorado State University, Fort Collings. Colorado.

DEAS, M. L.; LOWNEY, C. L. **Water Temperature Water Review**. California Water Modelling Forum. Central Valley. California, 2000.

DIAZ, G. E.; BROWN, T. C.; SVEINSSON, O. Planning Water Allocation In River Basins, AQUARIUS: A System's Approach. **Proceedings of 2nd Federal Interagency Hydrologic Modeling Conference, Subcommittee on Hydrology of the Advisory Committee on Water Information**. Las Vegas, 2002. Disponível em <<http://www.fs.fed.us/rm/value/aquariusdwnld.html>>. Acesso em: 01 de maio 2004.

E.L. (ENVIRONMENTAL LABORATORY). **CE-QUAL-RIV1: A Dynamic, One-Dimensional (Longitudinal) Water Quality Model for Streams: User's Manual**,

Instruction Report EL-95-2. U.S. Army Engineers Waterways Experiment Station. Vicksburg, MS. 1995. 186 p.

EIKER E., BUSHMAN J., GOTTESMAN J.L. E.L. (Environmental Laboratory). **CE-QUAL-R1: A numerical one-dimensional model of reservoir water quality, User's manual**, Instruction Report E-82-1 (Revised Edition). U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station. Vicksburg, MS. 1995. 427 p.

FISHER, P.; ABRAHART, R. J.; HERBINGER, W. The sensitivity of two distributed non-point source pollution models to the spatial arrangement of the landscape. **Hydrobiological Processes**. Vol. 11, p. 241-252, 1997.

GAMA, M. A. P. **Dinâmica do Fósforo em Solo Submetido a Sistemas de Preparo Alternativos ao de Corte e Queima no Nordeste Paranaense**. Abril, 2002. 96 p. Dissertação Mestrado - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz da Universidade de São Paulo, Piracicaba.

GESP / SES / SABESP (Governo do Estado de São Paulo / Secretaria de Energia e Saneamento / Cia. de Saneamento Básico do Estado de São Paulo). **DATA OPER, SISTEMA CANTAREIRA**. 82 p. São Paulo, 1989.

HAMILTON, D. P.; HOCKING, G. C.; PATTERSON, J. C. Criteria for selection of spatial dimension of one- and two-dimensional water quality models. **Mathematics and Computers in Simulation**. N° 43, p. 387-393, 1997.

HAMILTON, D. P.; SCHLADOW, S. G. Prediction of water quality in lakes and reservoirs. Part I: Model description. **Ecological Modelling**. Vol. 96, p. 91-110, 1997.

HAMRICK, J.M. User's Manual for the Environmental Fluid Dynamics Computer Code, Special Report No. 331 in **Applied Marine Science and Ocean Engineering, School of Marine Science**, Virginia Institute of Marine Science, The College of William and Mary, Gloucester Point, VA. 1996.

HAN et al. The thermal structure of Sau Reservoir (NE: Spain): a simulation approach. **Ecological Modelling**. Vol. 125, p. 109-122, 2000.

HANSEN, I. S. Aquatic numerical modeling – A management tool regarding dispersion and decay of pollutants. **Resources, Conservation and Recycling**. Vol. 16, p. 167-177, 1996.

HEJZLAR, J. et al. Importance of epilimnion phosphorus loading and wind-induced flow for phytoplankton growth in Rimov Reservoir. **Water Science and Technology**. Vol. 28, p. 5-14, 1993.

HIPSEY, M. R. et al. **Computational Aquatic Ecosystem Dynamics Model (CAEDYM):** User Manual Version 2.0. Centre for Water Research, University of Western Australia. Australia, 2003.

HODGES, B.; DALLIMORE, C. **Estuary and Lake Computer Model (ELCOM):** Science Manual Code Version 1.5.0. Centre for Water Research, University of Western Australia. Australia, 2001.

_____; _____. **Estuary and Lake Computer Model (ELCOM):** User Manual Code Version 1.5.0. Centre for Water Research, University of Western Australia. Australia, 2001.

IMBERGER, J.; PATTERSON, J.C. **Dynamic Reservoir Model – DYSRESM:** 5. Transport Models for Inland and Coastal Waters, Academic Press. p. 310-361. New York. in Proc. Symp. On Predictive Ability. Berkeley, CA. 1980.

JANSE, J. H. a model of nutrient dynamics in shallow lakes in relation of multiple stable states. **Hydrobiology** 342/343:1-8. 1997.

_____; OCH VAN LIERE, L. PCLAKE: a modeling tool for evaluation of lake restoration scenarios. **Water Science and Technology**. Vol. 31, p. 371-374, 1995.

_____; VAN DONK, E.; ALDENBERG. T. A model study of the stability of the macrophyte-dominated states as affected by biological factors. **Water Research**. Vol. 32, p. 2696-2706, 1998.

_____; ALDENBERG. T.; KRAMER, P. R. G. A mathematical model of the phosphorus cycle in Lake Loosdrecht and simulation of additional measures. **Hydrobiology** 233: 119-136. 1992.

JØRGENSEN, S. E.; HALLING-SØERENSEN, B.; NIELSEN, S. N. **Handbook of Environmental and Ecological Modelling**. Boca Raton, 1996. 672 p.

KAO, J. J.; LIN, W. L.; TSAI, C. H. Dynamic Spatial Modeling Approach of Estimation of Internal Phosphorus Load. **Water Resources**. Vol. 32, N°1, p. 47-56, 1998.

KARAGOUNIS, I. Ein physikalisch-biochemisches Seemodell; Anwendung auf das Nordbecken des Luganersees. **Laboratory of Hydraulics, Hydrology and Glaciology, Federal Institute of Technology**. Communications Nr. 116. Zurich. Suíça, 1992.

_____; TRÖSCH, J.; ZAMBONI, F. A coupled physical-biochemical lake model for forecasting water quality. **Aquatic Sciences**. Vol. 2, p. 87-102, 1993.

KENNINGTON, J. L.; HELGASON, L. V. **Algorithms for Network Programming**. Nova Iorque, 1980.

KLAGHOFER, E.; BIRNBAUM, W.; SUMMER, W. Linking sediment and nutrient export models with a geographic information system. **Applications of Geographic Information Systems in Hydrology and Water Resources Management**. Nº 211, p. 501-506. 1993.

LABADIE, J. W. **Combining Simulation and Optimization in River Basin Management**. Fort Collins, Colorado, 1993.

_____. **MODSIM: River Basin Network Flow Model For Conjunctive Stream-Aquifer Management**, Program user Manual and Documentation. Department of Civil Engineering. Colorado State University. Fort Collins, Colorado, 1995

_____. <ftp://modsim.engr.colostate.edu/CE/cd/modsim/Documentation/modsim_intro.PDF>. Acesso em: 01 de junho 2003.

LOGANATHAN, G. V.; BHATTACHARYA, D. Goal-Programming Techniques for Optimal Reservoir Operations. **Journal of Water Resources Planning and Management**. ASCE, Vol. 116, Nº6, p. 320-338, 1990.

MAHAMAH, D. S.. Simplifying assumptions in water quality modeling. **Ecological Modelling**. Vol.109, p. 295-300, 1998.

MARINS, F. A. S. et al. Algorithms for Network Piecewise-Linear Programs: A Comparative Study. Theory and Methodology. **European Journal of Operational Research**. Vol. 97, p. 183-193. 1997.

PARK, K.; KUO, A.Y.; SHEN, J.; HAMRICK, J. A Three-Dimensional Hydrodynamic-Eutrophication Model (HEM3D): Description of Water Quality and Sediment Process Submodels, Special Report No. 327 in **Applied Marine Science and Ocean Engineering, School of Marine Science**, Virginia Institute of Marine Science, The College of William and Mary, Gloucester Point, VA. 1995.

PORTO, M. F. A. **Sensibilidade de Modelos de Estratificação térmica em Reservatórios a Dados de Radiação Solar.** 1991. 204 p. Tese de Doutorado - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.

PORTO, R. L. L. (Organizador). **Técnicas Quantitativas para o Gerenciamento de Recursos Hídricos.** Associação Brasileira de Recursos Hídricos (ABRH). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 1997. 420 p.

QUINN, N. W. T. et al. **Model Integration For Assessing Future Hydroclimate Impacts On Water Resources, Agricultural Economic Sustainability and Environment Quality.** Berkeley National Laboratory. Califórnia, 2002. Disponível em: <http://www.iemss.org/iemss2002/proceedings/pdf/volume%20tre/55_quinn.pdf>. Acesso em: 04 de outubro 2003.

RAUCH, W. et al. River Water Quality Modelling: I. State of The Art. **Water Science and Technology.** Vol. 38, No. 11, p. 237-244, 1998.

RELATIVE HUMIDITY EQUATIONS. Disponível em: <<http://www.uswcl.ars.ag.gov/exper/relhumeq.htm>>. Acesso em: 20 de maio 2004.

REYNOLDS, C. S.; IRISH, A. E.; ELLIOTT, J. A. The ecological basis for simulating phytoplankton responses to environmental change (PROTECH). **Ecological Modelling.** Vol. 140, p. 271-291, 2001.

ROBERTO, A. N. **Modelos de Rede de Fluxo Para Alocação da Água Entre Múltiplos Usos em Uma Bacia Hidrográfica.** Junho, 2002. 105 p. Dissertação Mestrado - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.

RODE, M.; FREDE, H. G. Modification of AGNPS for agricultural land and climate conditions in Central Germany. **Journal of Environmental Quality.** N° 26, p. 165-172, 1997.

ROMERO, J. R. et al. **Computational Aquatic Ecosystem Dynamics Model (CAEDYM):** Science Manual Version 2.0. Centre for Water Research, University of Western Australia. Australia, 2003.

SABESP/THEMAG. Sistema Cantareira, Interligação Jaguari-Cachoeira, Tomada D'Água Seletiva. Nota Técnica IJC-NT-064. **Manual de Operação: Comportas de Controle e Emergência.** São Paulo, 1986.

SCHLADOW, S. G.; HAMILTON, D. P. Prediction of water quality in lakes and reservoirs. Part II: Model calibration, sensitivity analysis and application. **Ecological Modelling**. Vol. 96, p. 111-123, 1997.

SMIC (Surface Water and Water Quality Models Information Clearinghouse). Apresentado pelo United States Geological Survey (USGS). Cita informações e resumos de projetos envolvendo modelos matemáticos de qualidade e superfície de água. Disponível em: <<http://smig.usgs.gov/SMIC/>>. Acesso em: 12 outubro 2003.

SNOWLING, S. D.; KRAMER, J. R. Evaluating modelling uncertainty for model selection. **Ecological Modelling**. Vol. 138, p. 17-30, 2001.

SOARES, R. S. Avaliação Ambiental de Sistemas. Universidade Federal de Santa Catarina. Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental. Aula 2: **Fundamentos de balanço de massa e unidade funcional**. 18 p. 2003.

SOLIS, H.; JANSEN, P. ORI 391: Network Flow Programming. 2002. Disponível em: <<http://www.geocities.com/catag35/outofkilter.html>>. Acesso em: 12 outubro 2003.

STRASKRABA, M.; TUNDISI, J. G. (Edit.). Tradução Dino Vanucci. **Diretrizes para o Gerenciamento de Lagos**, Vol. 9 - Gerenciamento da Qualidade da Água de Represas. International Lake Environment Committee, International Institute of Ecology. São Carlos. 2000. cap. 14, p. 195-210.

THORNTON, K. W.; LESSEM, A. S. A Temperature Algorithm for Modifying Biological Rates. **Transactions of the American Fisheries Society**. Vol. 107, Nº 2, p.284-287. 1978.

TUCCI, C. E. M. (Coord.). **Modelos Hidrológicos**. Associação Brasileira de Recursos Hídricos (ABRH). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 1998. 669 p.

_____. **Métodos Numéricos em Recursos Hídricos**, Capítulo 4. Modelos de Qualidade de Água em Reservatórios. Associação Brasileira de Recursos Hídricos (ABRH). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Vol.1. Rio de Janeiro, 1989. 380 p.

TUNDISI, J. G.; EIGER, S. (Consultores Técnicos). Governo do Estado de São Paulo / Secretaria de Estado do Meio Ambiente. Consórcio JPE / EPAL / TAHAL. **Reservatório Billings, Relatório Final**. São Paulo, 1998. 195 p.

USEPA (UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY). **QUAL2E Windows Interface User's Guide**. Office of Water. EPA/823/B/95/003. August, 1995.

VAN DER MOLEN, D. T. **The role of eutrophication models in management**. Ministry of Transport, Public Works and Water Management. Inst. For Inland Water Management and Waste Water Treatment. RIZA Report 99.020, Lelystad. Holanda, 1999.

_____. et al. Mathematical Modeling as a tool of management in eutrophication control of shallow lakes. **Hydrobiology**. 275/276: 479-492. 1994.

VILLA NOVA, N. A. **A Estimativa de Evaporação Potencial no Estado de São Paulo**. Dezembro, 1967. 63 p. Tese de Doutorado - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz da Universidade de São Paulo, Piracicaba.

WATER Forum Proposal EIR (WFPE). Modeling Technical Appendix G. **Surface Water Resources, Inc.** November, 1998. p. 44.

WLOSINSKI, J. H. Flux Use For Calibrating and Validating Models. American Society Cience Engineer (ASCE), **Journal of Environmental Engineering**, Vol. 111, N°3, p. 272-284. Junho, 1985.

WOOL, T. A. et al. Water Quality Analysis Simulation Program (WASP), version 6.0. Draft: User's Manual. Environmental Protection Agency (EPA). Atlanta, 2001.

YOUNG, R. et al. AGNPS: Agricultural Non-Point Source Pollution Model: a watershed analysis tool. USDA-Agricultural Research Service, Conservation Service Report 35, USDA, Washington, D. C., 1987.

ZAGONA, E. A. et al. RiverWare: A Generalized Tool For Complex Reservoirs System Modeling. **Journal of The America Water Resources Association (JAWRA)**. Vol. 37, N°4, p.913-929, 2001.

ANEXO A – O Algoritmo OUT-OF-KILTER (OOK)

A.1 Funcionamento do algoritmo OUT-OF-KILTER (OOK)

O algoritmo tem como objetivo minimizar a seguinte equação matemática (função-objetivo):

$$\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N C_{ij} * Q_{ij} \quad (A.1)$$

com as seguintes restrições:

$$\sum_{i \in I_j} Q_{ij} - \sum_{k \in O_j} Q_{jk} = 0 \quad (A.2)$$

$$Q_{ij} \leq U_{ij} \quad (A.3)$$

$$Q_{ij} \geq L_{ij} \quad (A.4)$$

onde: I_j = conjunto de nós cujos arcos terminam em j ;

O_j = conjunto de nós cujos arcos iniciam no nó j .

C_{ij} = custo do transporte de uma unidade de fluxo através do arco (i,j)

Q_{ij} = quantidade de fluxo que passa pelo arco (i,j)

U_{ij} = capacidade máxima no arco (i,j)

L_{ij} = capacidade mínima no arco (i,j)

O problema é dividido em duas fases: Primal e Dual

Em cada nó é associada uma variável dual **Wi** na equação de conservação de massa, eq.(A.2), uma variável dual **Vij** com cada limite mínimo na eq.(A.4) e uma variável **Hij** com cada limite máximo na eq.(A.3). Com isto, tem-se o problema dual da seguinte forma:

$$\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m L_{ij} * V_{ij} - \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m U_{ij} * H_{ij} \quad (A.5)$$

sujeita a:

$$W_i - W_j + V_{ij} - H_{ij} = C_{ij} \quad i, j = 1, \dots, m \quad (A.6)$$

$$H_{ij}, V_{ij} \geq 0 \quad i, j = 1, \dots, m \quad (A.7)$$

$$-\infty \leq W_i \leq +\infty \quad i = 1, \dots, m \quad (A.8)$$

Rearrmando-se os termos da eq.(A.6) tem-se:

$$V_{ij} - H_{ij} = C_{ij} - W_i + W_j \quad (A.9)$$

onde: $C_{ij} - W_i + W_j$ é o custo líquido do arco (i, j) , o que leva em consideração o custo de transporte e o custo dos nós terminais que compõem o arco.

O lucro líquido do arco (i, j) é então representado por:

$$dC_{ij} = -(V_{ij} - H_{ij}) \quad (A.10)$$

$$\therefore dC_{ij} = W_i - W_j - C_{ij} \quad (A.11)$$

Aplicando-se as condições de relaxamento tem-se o seguinte critério de otimização:

$$dC_{ij} < 0 \Rightarrow Q_{ij} = L_{ij} \quad (A.12)$$

$$dC_{ij} > 0 \Rightarrow Q_{ij} = U_{ij} \quad (A.13)$$

$$dC_{ij} = 0 \Rightarrow L_{ij} \leq Q_{ij} \leq U_{ij} \quad (A.14)$$

A eq.(A.12) representa a condição de lucro líquido negativo no arco (i,j) no qual o fluxo deve ser o menor possível; a eq.(A.13) representa a condição de lucro líquido positivo o que significa que o fluxo deve ser o maior possível. A eq.(A.14) representa lucro líquido no arco (i,j) igual a zero, o que significa que os limites mínimo e máximo de fluxo não devam ser violados.

As eq.(A.12), eq.(A.13) e eq.(A.14) representam o Estado de Kilter e, portanto, o fluxo no respectivo arco (i,j). Se o fluxo no arco (i,j) violar qualquer uma dessas condições diz-se que o mesmo está *Fora-de-Kilter (Out-Of-Kilter)* e caso contrário, ou seja, se as condições de otimização forem obedecidas, diz-se que o arco está *Em-Kilter (In-Kilter)*. Ao longo da alternância entre a fase primal (variando valores para Q_{ij}) e a fase dual (variando os valores para W_i), o algoritmo procura satisfazer as condições de otimização até que todos os arcos de uma rede de fluxo estejam *Em-Kilter* (Roberto, 2002).

Os Estados de Kilter estão descritos na tabela a seguir:

Tabela A.1- Possíveis Estados de Kilter (Out-of-Kilter ou In-Kilter) e Kilter Number (KN) nos arcos (i,j)⁵⁷

Fluxo \ Custo Líquido	$dC_{ij} < 0$	$dC_{ij} = 0$	$dC_{ij} > 0$
$Q_{ij} > U_{ij}$ situação 1	$KN = Q_{ij} - L_{ij}$ <i>Out-Of-Kilter</i>	$KN = Q_{ij} - U_{ij}$ <i>Out-Of-Kilter</i>	$KN = Q_{ij} - U_{ij}$ <i>Out-Of-Kilter</i>
$Q_{ij} = U_{ij}$ situação 2	$KN = Q_{ij} - L_{ij}$ <i>Out-Of-Kilter</i>	$KN = ZERO$ <i>In-Kilter</i>	$KN = ZERO$ <i>In-Kilter</i>
$L_{ij} < Q_{ij} < U_{ij}$ situação 3	$KN = Q_{ij} - L_{ij}$ <i>Out-Of-Kilter</i>	$KN = ZERO$ <i>In-Kilter</i>	$KN = Q_{ij} - U_{ij}$ <i>Out-Of-Kilter</i>
$Q_{ij} = L_{ij}$ situação 4	$KN = ZERO$ <i>In-Kilter</i>	$KN = ZERO$ <i>In-Kilter</i>	$KN = Q_{ij} - U_{ij}$ <i>Out-Of-Kilter</i>
$Q_{ij} < L_{ij}$ situação 5	$KN = Q_{ij} - L_{ij}$ <i>Out-Of-Kilter</i>	$KN = Q_{ij} - L_{ij}$ <i>Out-Of-Kilter</i>	$KN = Q_{ij} - U_{ij}$ <i>Out-Of-Kilter</i>

⁵⁷ Adaptado de Roberto (2002).

Na condição inicial do algoritmo OOK inicia-se com os fluxos na rede iguais a zero. Em cada arco (i,j) são calculados o lucro líquido e , os respectivos, Número de Kilter e Estado de Kilter. Se todos os arcos estiverem In-Kilter, então uma solução ótima foi encontrada. Caso contrário, passa-se para a fase Primal.

A.1.1 Fase Primal do OOK

Verifica-se qual arco (p,q) esteja Fora-de-Kilter. Com base na rede de fluxo original é construída uma rede de fluxo temporária onde serão variados os valores de fluxo. A rede temporária deverá ser construída tentando-se incluir o arco (p,q) Fora-de-Kilter formando um novo circuito (Roberto, 2002). Determina-se então a menor variação de fluxos (Δ) dentre todas as possíveis variações dos arcos desse circuito, cujos novos fluxos serão dados então por:

$$Q_{ij} = Q_{ij} + \Delta \quad (\text{A.15})$$

Reinicia-se a fase primal e se não existir nenhum circuito contendo o arco (p,q) passa-se para a fase dual.

A.1.2 Fase Dual do OOK

Nesta fase determina-se um conjunto de nós X que podem ser alcançados a partir do nó q ao longo de uma trajetória de rede temporária e o conjunto de nós Y que não pertençam a X .

Deve-se então calcular a seguinte equação:

$$\theta = \text{Mínimo}\{|dC_{ij}|, \infty\}, (i, j) \in (S1 \cup S2) \quad (\text{A.16})$$

onde:

$$S1 = \{(i, j) : i \in X, j \in Y, dC_{ij} < 0, Q_{ij} \leq U_{ij}\} \quad (\text{A.17})$$

$$S2 = \{(i, j) : i \in Y, j \in X, dC_{ij} > 0, Q_{ij} \geq I_{ij}\} \quad (\text{A.18})$$

Com o resultado da eq.(A.16), alteram-se os valores de W_i e de dC_{ij} , conforme equações abaixo, retornando à fase primal:

$$W_i = W_i + \theta \quad \text{se} \quad i \in X \quad (\text{A.19})$$

$$W_i = W_i \quad \text{se} \quad i \in Y \quad (\text{A.20})$$

$$dC_{ij} = dC_{ij} \quad \text{se} \quad (i, j) \in (X, X) \cup (Y, Y) \quad (\text{A.21})$$

$$dC_{ij} = dC_{ij} + \theta \quad \text{se} \quad (i, j) \in (X, Y) \quad (\text{A.22})$$

$$dC_{ij} = dC_{ij} - \theta \quad \text{se} \quad (i, j) \in (Y, X) \quad (\text{A.23})$$

Se $\theta = \infty$ então o processo deve ser interrompido porque não existe solução viável.

A.2 Exemplo de aplicação do algoritmo OUT-OF-KILTER

A seguir tem-se uma rede de fluxo, apresentada por Roberto (2002), sendo seu procedimento esmiuçado para exemplificar seu funcionamento.

Figura A.1 - Rede de Fluxo em situação inicial

Para os arcos da rede acima descrita na figura A.1, adotou-se a notação (L_{ij}, U_{ij}, C_{ij}) onde:

i e j = nó inicial (i) e nó final (j) de um arco

L_{ij} = capacidade mínima no arco (i,j)

U_{ij} = capacidade máxima no arco (i,j)

C_{ij} = custo unitário do arco (i,j)

Para início dos cálculos adota-se $Q_{ij} = 0$ em todos os arcos e a variável dual $W_i = 0$ em todos os nós. O próximo passo é calcular o lucro líquido dC_{ij} em cada arco e os respectivos Estado de Kilter e Número de Kilter (ou Kilter Number - KN), cujos resultados estão representados na figura A.2.

Lembrando que a equação do lucro líquido dC_{ij} de cada arco é dado pela eq.(A.11), tem-se os seguintes valores para a rede apresentada:

$$dC_{1,2} = 0 - 0 - 1 \Rightarrow dC_{1,2} = -1$$

$$dC_{2,3} = 0 - 0 - 5 \Rightarrow dC_{2,3} = -5$$

$$dC_{3,4} = 0 - 0 - (-3) \Rightarrow dC_{3,4} = 3$$

$$dC_{4,5} = 0 - 0 - (-1) \Rightarrow dC_{4,5} = 1$$

$$dC_{5,1} = 0 - 0 - 0 \Rightarrow dC_{5,1} = 0$$

$$dC_{5,2} = 0 - 0 - 3 \Rightarrow dC_{5,2} = -3$$

$$dC_{2,4} = 0 - 0 - 0 \Rightarrow dC_{2,4} = 0$$

Lembrando que nesta fase inicial, tem-se:

$Q_{1,2} = Q_{2,3} = Q_{3,4} = Q_{4,5} = Q_{5,1} = Q_{5,2} = Q_{2,4} = 0$ (ZERO), os Estados de Kilter e Números de Kilter (KN) são calculados conforme a Tabela A.1 da seguinte forma:

$$Q_{1,2} < I_{1,2} \text{ onde } I_{1,2} = 2 \Rightarrow KN = |0 - 2| = 2; \quad dC_{1,2} = -1 \therefore dC_{1,2} < 0 \Rightarrow \text{OOK}$$

$$Q_{2,3} = I_{2,3} \text{ onde } I_{2,3} = 0 \Rightarrow KN = 0; \quad dC_{2,3} = -5 \therefore dC_{2,3} < 0 \Rightarrow \text{IK}$$

$$Q_{3,4} = I_{3,4} \text{ onde } U_{3,4} = 4 \Rightarrow KN = |0 - 4| = 4; \quad dC_{3,4} = 3 \therefore dC_{3,4} > 0 \Rightarrow \text{OOK}$$

$$Q_{4,5} < I_{4,5} \text{ onde } U_{4,5} = 5 \Rightarrow KN = |0 - 5| = 5; \quad dC_{4,5} = 1 \therefore dC_{4,5} > 0 \Rightarrow \text{OOK}$$

$$Q_{5,1} = I_{5,1} \text{ onde } I_{5,1} = 0 \Rightarrow KN = 0; \quad dC_{5,2} = 0 \therefore dC_{5,1} = 0 \Rightarrow \text{IK}$$

$$Q_{5,2} = I_{5,2} \text{ onde } I_{5,2} = 0 \Rightarrow KN = 0; \quad dC_{5,1} = -3 \therefore dC_{5,2} < 0 \Rightarrow \text{IK}$$

$$Q_{2,4} = I_{2,4} \text{ onde } I_{2,4} = 0 \Rightarrow KN = 0; \quad dC_{2,4} = 0 \therefore dC_{2,4} = 0 \Rightarrow \text{IK}$$

Figura A.2 - Rede de Fluxo da Fase Primal (Situação 1)

Da figura A.2 nota-se que os arcos (1,2), (3,4) e (4,5) estão Out-of-Kilter (OOK). A partir desta rede real construiu-se uma rede temporária, representada na figura A.3, contendo o nó $(p, q) = (1, 2)$. O circuito da rede temporária é então definido por $C = \{(1, 2), (2, 4), (4, 5), (5, 1)\}$ e Δ , que é a menor variação (diminuição ou incremento) de fluxo, dentre todas as possíveis variações de fluxo dos arcos da rede temporária, necessária para se colocar um determinado arco In-Kilter. Como nesta rede todas as vazões estão zeradas, Δ é calculado da seguinte forma:

$$\left. \begin{aligned}
 \Delta_{1,2} \text{ para } (1, 2) \text{ ficar In Kilter: } dC_{1,2} < 0 \therefore Q_{1,2} \text{ deve ser igual a } L_{1,2} &\Rightarrow \Delta_{1,2} = 2 \\
 \Delta_{2,4} \text{ para } (2, 4) \text{ ficar In Kilter: } dC_{2,4} = 0 \therefore 0 \leq Q_{2,4} \leq 5 \text{ (situações 2, 3 e 4)} &\Rightarrow \Delta_{2,4} = 5 \\
 \Delta_{4,5} \text{ para } (4, 5) \text{ ficar In Kilter: } dC_{4,5} > 0 \therefore Q_{4,5} \text{ deve ser igual a } U_{4,5} &\Rightarrow \Delta_{4,5} = 5 \\
 \Delta_{5,1} \text{ para } (5, 1) \text{ ficar In Kilter: } dC_{5,1} = 0 \therefore 0 \leq Q_{5,1} \leq 6 \text{ (situações 2, 3 e 4)} &\Rightarrow \Delta_{5,1} = 6 \\
 \Delta_{3,4} \text{ para } (3, 4) \text{ ficar In Kilter: } dC_{3,4} > 0 \therefore Q_{3,4} \text{ deve ser igual a } U_{3,4} &\Rightarrow \Delta_{3,4} = 4
 \end{aligned} \right\} \therefore \Delta = 2$$

Figura A.3 - Rede de fluxo temporária da fase primal (situação 1)

Os novos valores de Q_{ij} serão dados por $Q_{ij} = Q_{ij} + \Delta$. Reconstruiu-se a rede e reiniciou-se a fase primal conforme figura A.4.

Figura A.4 - Rede defluxo na fase primal (situação 2)

Na figura A.4 nota-se que os arcos (3, 4) e (4, 5) ainda estão Out-of-Kilter. Construiu-se então uma nova rede temporária representada pela figura A.5 onde os valores em cada arco referem-se à Δ (redução e/ou incremento) para o link ficar In-Kilter. Entretanto, a nova rede não fecha um circuito. Neste caso o próximo passo é a fase dual onde poderão ser alterados os valores de W_i .

Figura A.5 - Rede de fluxo temporária na fase primal (situação 2)

Nesta rede adotou-se $(p, q) = (3, 4)$, obtendo-se os seguintes valores:

$$X = \{1, 2, 4, 5\} \text{ e } Y = \{3\}$$

$$S1 = \{(2, 3)\} \text{ e } S2 = \{(3, 4)\}$$

$$\theta = \text{Mínimo } \{|dC_{2,3}|, |dC_{3,4}|\} = \text{Mínimo } \{|-5|, |3|\} \therefore \theta = 3$$

Com o valor de $\theta = 3$ foram alterados os valores de W_i conforme equações eq.(A.19), eq.(A.20) e de dC_{ij} conforme equações eq.(A.21), eq.(A.22) e eq.(A.23) voltando-se à fase primal, da seguinte forma:

$$W_1 = W_1 + \theta = 0 + 3 \Rightarrow W_1 = 3$$

$$W_2 = W_2 + \theta = 0 + 3 \Rightarrow W_2 = 3$$

$$W_3 = W_3 \Rightarrow W_3 = 0$$

$$W_4 = W_4 + \theta = 0 + 3 \Rightarrow W_4 = 3$$

$$W_5 = W_5 + \theta = 0 + 3 \Rightarrow W_5 = 3$$

$$dC_{1,2} = dC_{1,2} = -1 \therefore dC_{1,2} < 0 \quad \text{onde } Q_{1,2} = I_{1,2} \Rightarrow \quad KN = 0 \Rightarrow IK$$

$$dC_{2,3} = dC_{2,3} + \theta = -5 + 3 = -2 \therefore dC_{2,3} < 0 \quad \text{onde } Q_{2,3} = I_{2,3} \Rightarrow \quad KN = 0 \Rightarrow IK$$

$$dC_{3,4} = dC_{3,4} - \theta = 3 - 3 = 0 \therefore dC_{3,4} = 0 \quad \text{onde } Q_{3,4} = I_{3,4} \Rightarrow \quad KN = 0 \Rightarrow IK$$

$$dC_{4,5} = dC_{4,5} = 1 \therefore dC_{4,5} > 0; Q_{4,5} = I_{4,5}; U_{4,5} = 5 \Rightarrow \quad KN = |2 - 5| = 3 \Rightarrow \text{OOK}$$

$$dC_{5,1} = dC_{5,1} = 0 \therefore dC_{5,1} = 0 \quad \text{onde } I_{5,1} < Q_{5,1} < U_{5,1} \Rightarrow \quad KN = 0 \Rightarrow IK$$

$$dC_{5,2} = dC_{5,2} = -3 \therefore dC_{5,2} < 0 \quad \text{onde } Q_{5,2} = I_{5,2} \Rightarrow \quad KN = 0 \Rightarrow IK$$

$$dC_{2,4} = dC_{2,4} = 0 \therefore dC_{2,4} = 0 \quad \text{onde } Q_{2,4} = I_{2,4} \Rightarrow \quad KN = 0 \Rightarrow IK$$

Figura A.6 - Rede de fluxo na fase primal (situação 3)

Os resultados estão representados na figura A.6. Nessa mesma figura A.6, entretanto, nota-se que o arco (4, 5) ainda está Fora-de-Kilter o que demanda a construção de uma nova rede temporária representada na figura A.7.

Da figura A.7 nota-se que não é possível fechar um circuito, encerrando a fase primal e iniciando a fase dual. Na rede temporária adotou-se $(p, q) = (4, 5)$ obtendo-se os seguintes valores:

$$X = \{1, 5\}; \quad Y = \{2, 3, 4\}; \quad S1 = \{(1, 2), (5, 2)\} \quad \text{e} \quad S2 = \{(4, 5)\}$$

$$\theta = \text{Mínimo } \{|dC_{1,2}|, |dC_{5,2}|, |dC_{4,5}|\} = \text{Mínimo } \{|-1|, |-3|, |1|\} \therefore \theta = 1$$

Figura A.7 - Rede de Fluxo temporária na fase primal (situação 3)

Com o valor de $\theta = 1$ foram novamente alterados os valores de W_i conforme equações eq.(A.19), eq.(A.20) e de dC_{ij} conforme equações eq.(A.21), eq.(A.22) e eq.(A.23) voltando-

se à fase primal, a seguir descrito e cujo resultado das modificações e a nova rede da fase primal estão representados na figura A.8:

$$W_1 = W_1 + \theta = 3 + 1 \Rightarrow W_1 = 4$$

$$W_2 = W_2 \Rightarrow W_2 = 3$$

$$W_3 = W_3 \Rightarrow W_3 = 0$$

$$W_4 = W_4 \Rightarrow W_4 = 3$$

$$W_5 = W_5 + \theta = 3 + 1 \Rightarrow W_5 = 4$$

$$dC_{1,2} = dC_{1,2} + \theta = -1 + 1 = 0 \therefore dC_{1,2} = 0 \quad \text{onde } Q_{1,2} = I_{1,2} \Rightarrow \quad KN = 0 \quad \Rightarrow IK$$

$$dC_{2,3} = dC_{2,3} = -2 \therefore dC_{2,3} < 0 \quad \text{onde } Q_{2,3} = I_{2,3} \Rightarrow \quad KN = 0 \quad \Rightarrow IK$$

$$dC_{3,4} = dC_{3,4} = 0 \therefore dC_{3,4} = 0 \quad \text{onde } Q_{3,4} = I_{3,4} \Rightarrow \quad KN = 0 \quad \Rightarrow IK$$

$$dC_{4,5} = dC_{4,5} - \theta = 1 - 1 = 0 \therefore dC_{4,5} = 0 \quad \text{onde } Q_{4,5} = I_{4,5} \Rightarrow \quad KN = 0 \quad \Rightarrow IK$$

$$dC_{5,1} = dC_{5,1} = 0 \therefore dC_{5,1} = 0 \quad \text{onde } I_{5,1} < Q_{5,1} < U_{5,1} \Rightarrow KN = 0 \quad \Rightarrow IK$$

$$dC_{5,2} = dC_{5,2} + \theta = -3 + 1 = -2 \therefore dC_{5,2} < 0 \quad \text{onde } Q_{5,2} = I_{5,2} \Rightarrow \quad KN = 0 \quad \Rightarrow IK$$

$$dC_{2,4} = dC_{2,4} = 0 \therefore dC_{2,4} = 0 \quad \text{onde } I_{2,4} < Q_{2,4} < U_{2,4} \Rightarrow KN = 0 \quad \Rightarrow IK$$

Figura A.8 - Rede de fluxo na fase primal (situação 4 final com solução ótima obtida)

Na rede apresentada na figura A.8 nota-se que todos os arcos estão Em-Kilter, concluindo-se que uma solução ótima foi encontrada e o algoritmo foi encerrado, isto é, os valores de Q_{ij} ótimos foram definidos.

ANEXO B – Parâmetros de Qualidade Simulados (fase 3 de CALIBRAÇÃO)

B.1 Oxigênio Dissolvido

A seguir são apresentados alguns gráficos de Oxigênio Dissolvido resultantes da Fase 3 de CALIBRAÇÃO do modelo CE-QUAL-R1 para a Represa Jaguari-Jacareí:

Figura B.1 - Oxigênio Dissolvido (Real x Simulado) na fase 3 de CALIBRAÇÃO (1990 a 1995)

Figura B.2 - Oxigênio Dissolvido (Real x Simulado) na fase 3 de CALIBRAÇÃO (1996 a 1999)

B.2 pH

A seguir são apresentados alguns dos gráficos de pH resultantes da Fase 3 de CALIBRAÇÃO do modelo CE-QUAL-R1 para a Represa Jaguari-Jacareí:

Figura B.3 - pH (Real x Simulado) na fase 3 de CALIBRAÇÃO (1990 a 1992)

Figura B.4 - pH (Real x Simulado) na fase 3 de CALIBRAÇÃO (1993 a 1999)

B.3 Ferro Solúvel

A seguir são apresentados alguns dos gráficos de Ferro Solúvel resultantes da Fase 3 de CALIBRAÇÃO do modelo CE-QUAL-R1 para a Represa Jaguari-Jacareí:

Figura B.5 - Ferro Solúvel (Real x Simulado) na fase 3 de CALIBRAÇÃO (1990 a 1995)

B.4 Manganês Solúvel

A seguir são apresentados alguns dos gráficos de Manganês Solúvel resultantes da Fase 3 de CALIBRAÇÃO do modelo CE-QUAL-R1 para a Represa Jaguari-Jacareí:

Figura B.6 - Manganês Solúvel (Real x Simulado) na fase 3 de CALIBRAÇÃO (1991 a 1995)

B.5 Coliformes Fecais

A seguir são apresentados alguns dos gráficos de Coliformes Fecais resultantes da Fase 3 de CALIBRAÇÃO do modelo CE-QUAL-R1 para a Represa Jaguari-Jacareí:

Figura B.7 - Coliformes Fecais (Real x Simulado) na fase 3 de CALIBRAÇÃO (1990 a 1995)

B.6 Manganês Insolúvel

A seguir são apresentados alguns dos gráficos de Manganês Insolúvel resultantes da Fase 3 de CALIBRAÇÃO do modelo CE-QUAL-R1 para a Represa Jaguari-Jacareí:

Figura B.8 - Manganês Insolúvel (Real x Simulado) na fase 3 de CALIBRAÇÃO (1996 a 1999)

ANEXO C – Visualização e Exemplo de Ajuste de Dados dos Afluentes

Figura C.1 - Temperaturas medidas nos pontos de amostragem JJ206 e JJ208 entre 1990 e 1999

Figura C.2 - Ajuste de polinômio para os dados de temperatura do ponto JJ206 no ano de 1990