

III SIMPÓSIO LUSO - BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL
(SILUBESA)

TEMA 5
QUALIDADE DA ÁGUA

MODELAÇÃO MATEMÁTICA EM GESTÃO DA QUALIDADE DE ÁGUAS SUPERFICIAIS
APLICAÇÃO A UM CASO TEÓRICO

J. M. PEREIRA VIEIRA

Doutor em Engenharia Civil, Professor Auxiliar da Área de Engenharia Civil da Universidade do Minho, Braga, Portugal.

RESUMO

No presente trabalho apresenta-se as principais características de um modelo de optimização (OPTIMA), desenvolvido para apoiar a tomada de decisões, no âmbito da formulação de políticas de controlo de qualidade de águas superficiais a nível de uma bacia hidrográfica.

Este modelo, partindo de um processo heurístico na definição do número e distribuição de Estações de Tratamento de Águas Residuais (ETAR) e de Estações de Tratamento de Água (ETA), bem como de sistemas alternativos de drenagem de esgotos, permite analisar um grande número de políticas possíveis, permitindo definir a solução óptima. Esta solução óptima é definida a partir da alternativa de custo mínimo para os esquemas de tratamento e transporte de águas e esgotos, tendo em conta a capacidade de auto-depuração e os padrões de qualidade estabelecidos para as águas superficiais. Para melhor compreensão das capacidades e limitações do modelo, faz-se a sua aplicação a uma bacia hidrográfica fictícia.

1. INTRODUÇÃO

A gestão dos recursos hídricos constitui uma tarefa de crescente complexidade na sociedade moderna. De facto, a progressiva urbanização e industrialização, a par da intensificação da agricultura, além de originarem maiores necessidades de água, são responsáveis pela grande quantidade de resíduos domésticos e industriais lançados no ambiente, provocando a deterioração da qualidade de águas subterrâneas e superficiais.

A complexa tarefa da gestão dos recursos hídricos disponíveis apresenta como factores determinantes o conflito de interesses gerados na sua utilização, o carácter aleatório dos fenómenos hidrológicos e limitações de ordem técnica, económica e social na tomada de decisões.

Na prática, a reprodução consistente e simplificadora da realidade por meio de modelos matemáticos em variadas situações de gestão de recursos hídricos, tem-se revelado muito atraente. A aplicação judiciosa dos modelos matemáticos a situações reais de planeamento, assumidas as suas limitações e hipóteses simplificadoras, pode constituir uma ferramenta poderosa capaz de proporcionar benefícios reais na actividade de gestão de recursos hídricos.

Neste contexto, têm sido desenvolvidos e aplicados modelos de simulação na definição do sistema natural, modelos de optimização, na geração de alternativas de esquemas de transporte e tratamento de águas e esgotos e modelos de decisão na escolha da melhor solução a implementar.

O modelo OPTIMA pode enquadrar-se no conjunto dos modelos de optimização ao qual se associa sempre o modelo de simulação do sistema natural.

2. DESCRIÇÃO GERAL DO MODELO

O modelo OPTIMA considera o sistema natural numa bacia hidrográfica constituído pelo rio principal e seus afluentes e um sistema complexo de ETAR, ETA, descargas de esgotos directas sem tratamento e esquemas alternativos de afluxo de esgotos a ETAR.

A procura da melhor estratégia de funcionamento do sistema, isto é, aquela a que corresponde a solução de custo mínimo - máximo benefício, é realizada no domínio das alternativas definidas no intervalo de dois cenários extremos: a) permissão de todas as descargas de tratamento, utilizando as águas superficiais como receptor de esgotos; b) tratamento de todas as descargas ao nível mais avançado possível, a custos inaceitáveis.

Considerando dados da região obtidos a partir de estudos prévios de engenharia (topografia, demografia, caudais e concentração de poluentes nos esgotos produzidos e padrões de qualidade exigidos para as águas superficiais), são geradas hipóteses alternativas de número e distribuição de ETAR e ETA e esquemas de transporte de esgotos. A estratégia optima é então determinada aplicando a Programação Dinâmica num processo sequencial de decisões, considerando, para o período de projecto, variáveis de engenharia e variáveis económicas.

Tendo em conta a capacidade de assimilação de poluente das águas superficiais e os limites pré-estabelecidos para a sua qualidade, o modelo permite a consideração de três opções de planeamento distintas, de acordo com a capacidade de tratamento instalada na região: Opção 1-Ausência de esquemas de tratamento em que se determina o custo mínimo, localização, capacidade e tipo de tratamento para o sistema a construir; Opção 2-Existência de um esquema de tratamento, para o qual é definida uma estratégia óptima de funcionamento; Opção 3-Funcionamento deficiente do sistema existente, em que se define a estratégia óptima para a localização, capacidade e tipo de tratamento dos novos esquemas de tratamento a implementar, tendo em como referência o funcionamento óptimo do sistema existente.

3. OPTIMIZAÇÃO DOS ESQUEMAS DE TRATAMENTO

O modelo de optimização utiliza a formulação do processo ramificado de convergência em Programação Dinâmica na simulação do sistema natural constituído pelo rio principal e seus afluentes. Baseada no "Princípio de Optimalidade de Bellman", esta técnica computacional revela-se de grande utilidade na resolução de problemas de controlo que podem ser tratados como processos de decisão em n estágios (BELLMAN et al., 1962).

Em Programação Dinâmica, problemas de decisão de n variáveis são decompostos em n problemas de decisão simples, que se designam estágios e representam um ponto no tempo ou no espaço, conforme o sistema físico considerado. A cada estágio está associada uma variável de estado, S_n , variável de decisão, D_n , uma variável transição, T_n , e uma função contribuição de estágio, R_n .

Na formulação do modelo, os vários cursos de água que constituem o sistema são divididos em n troços, cada um dos quais constitui um estágio no processo de optimização. Na Fig.1 apresentam-se as relações entre os elementos mais relevantes dentro de um estágio, tendo os símbolos o seguinte significado: WP-aglomerado populacional (ou indústria importante); GW-captação de água subterrânea para abastecimento de WP; WT-ETA para abastecimento a WP (em número de 1 a M); WD-descarga pontual sem tratamento; WW-ETAR implantada no troço considerado; WF-produtores de esgotos significativos (aglomerados ou indústrias descarregando em WW (em número de 1 a P)).

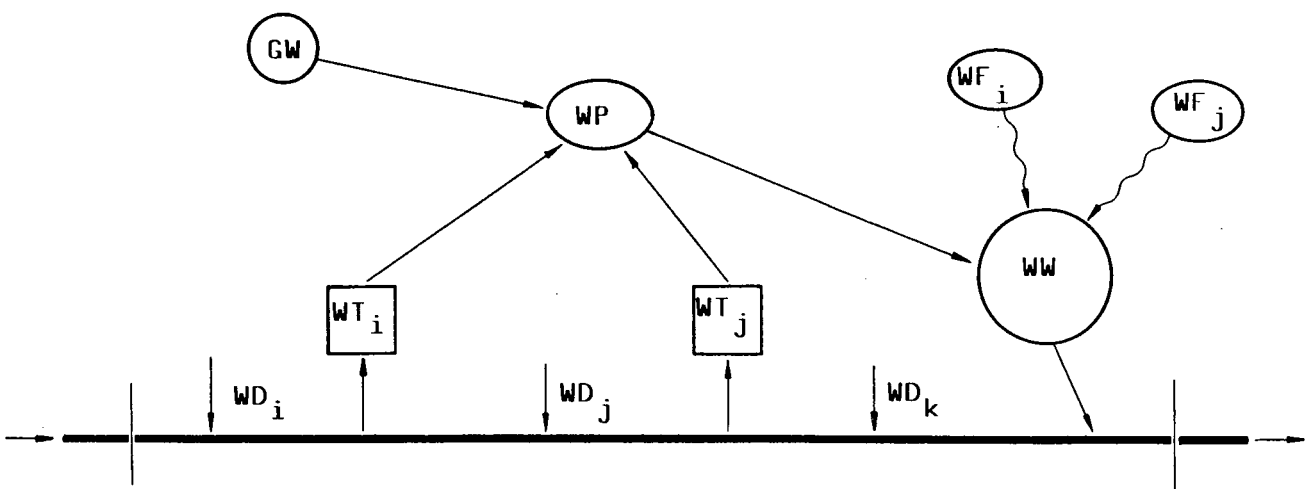


Fig. 1 - Representação esquemática de um estágio

A variável de estado (S_n) é representada pela concentração de material poluente nas águas superficiais. Considerou-se o caso mais geral de poluente degradável, em que a reacção de degradação foi assumida como de primeira ordem. No desenvolvimento do modelo, a carência bioquímica de oxigénio (CBO) foi tida como parametro-tipo. Para cada estágio, S_n é definida para um conjunto discreto de valores formando uma malha de nós limitada, inferior e superiormente, por valores que constituem os padrões de qualidade da água pré-estabelecidos ao longo de todos os troços do sistema. Após esta definição, o algoritmo de optimização cria um conjunto de decisões, D_n , do qual resulta um conjunto de contribuições de estágio, R_n , associado aos custos de cada decisão. Na Fig. 2 representa-se esquematicamente o processo de determinação da política óptima utilizado.

A função de transição em cada estágio, T_n , é obtida a partir de um balanço de massa, realizado em cada troço do sistema e define a forma como a variável de estado se transforma ao passar de um estágio para o seguinte.

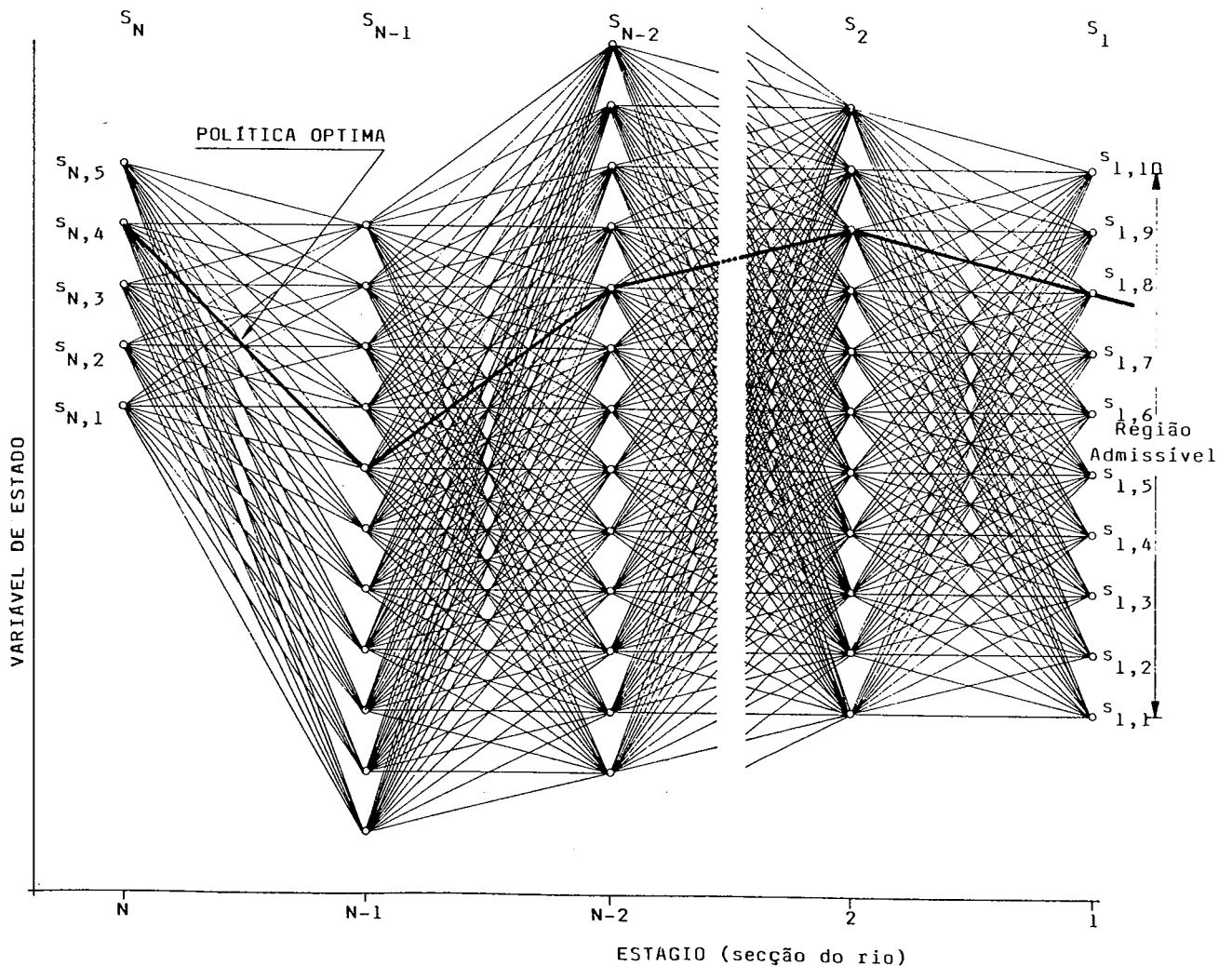


Fig. 2 - Esquema de determinação da solução optima utilizado em programação dinâmica

A função de contribuição de estágio, R_n , obtida para cada par de valores da variável de estado, S_n , e da variável de decisão, D_n , define-se pelo custo actualizado dos encargos de investimento, operação e manutenção de ETAR, ETA e sistemas de transporte de esgotos implantados no troço do rio considerado e tem a forma seguinte:

$$R_n = E_n + \alpha_n \sum_{m=1}^{M_n} C_{nm} + \beta_n \sum_{p=1}^{P_n} F_{np} - \sum B_n$$

$$n = 1, 2, 3, \dots, N$$

em que:

E_n = custo total actualizado de WW (investimento + operação e manutenção);

C_{nm} = custo total de WT (m);

F_{np} = custo total actualizado de estações e condutas elevatórias ou emissários transferindo esgotos de WF (p) para WW;

B_n = benefício directo;

α_n = indicador de existência de WT; 1 = existente; 0 = não existente;

β_n = indicador de existência de sistemas de transferência de esgotos de outros aglomerados, que não WP, para WW; 1 = conduta elevatória existente; 2 = emissário gravítico existente; 0 = não existente;

M_n = número de WT no troço n;

m = índice variando de 1 a M;

P_n = número de WF no troço n;

p = índice variando de 1 a P;

N = número de troços do sistema.

Mais detalhes sobre o algoritmo de optimização e a solução técnica aplicada podem ser encontrados em VIEIRA, 1986 e 1987.

4. APLICAÇÃO DO MODELO

Para a verificação do seu comportamento, o modelo foi testado em situações reais de planeamento.

Numa primeira fase, todas as capacidades e opções de planeamento foram utilizadas na aplicação a uma bacia hidrográfica fictícia. Nesta fase foi considerado separadamente o comportamento do modelo num sistema de rio com e sem afluentes. O presente trabalho apresenta, sucintamente, os aspectos relevantes relacionados com os dados e resultados obtidos num sistema fictício de rio sem afluentes (designado a seguir por rio Branco).

Numa segunda fase, o modelo foi aplicado à bacia hidrográfica do rio Ave na opção de planeamento que considera a ausência de esquemas de tratamento, tendo como objectivo determinar o custo mínimo, localização, capacidade e tipo de tratamento para o sistema a construir. Detalhes desta aplicação podem ser obtidos em VIEIRA e LIJKLEMA, 1988.

As bases de planeamento utilizadas na aplicação de todas as opções ao caso do rio Branco, estão esquematicamente representadas na Fig. 3. O custo total de transporte e tratamento de água e esgotos considerando nas várias alternativas inclui custos de investimento e custos de operação e manutenção actualizados

a 1985. Nesta aplicação apenas foram consideradas as hipóteses de tratamento biológico de esgotos pelos processos de leitos percoladores e lamas activadas. Na Fig. 4 apresenta-se como exemplo, funções de custo para o processo de leitos percoladores.

Para cada alternativa seleccionada, o modelo determina o custo total actualizado associado a política optima (política de custo mínimo para os parametros de qualidade impostos). Para além desta informação, o "output" do programa faz uma descrição detalhada de: a) troços em que o rio foi dividido; b) limites para a variável de estado (CBO); c) dimensão máxima de grelha dos valores da variável de estado usada no algoritmo de optimização; d) tipo de tratamento em cada estágio; e) concentração de material poluente em cada estágio; f) custos de investimento e custos totais associados a cada ETAR, ETA e sistemas elevatórios no periodo de análise. Nos Quadros 1, 2 e 3 reproduzem-se saídas de dados e resultados nas diferentes opções de planeamento permitidas pelo modelo.

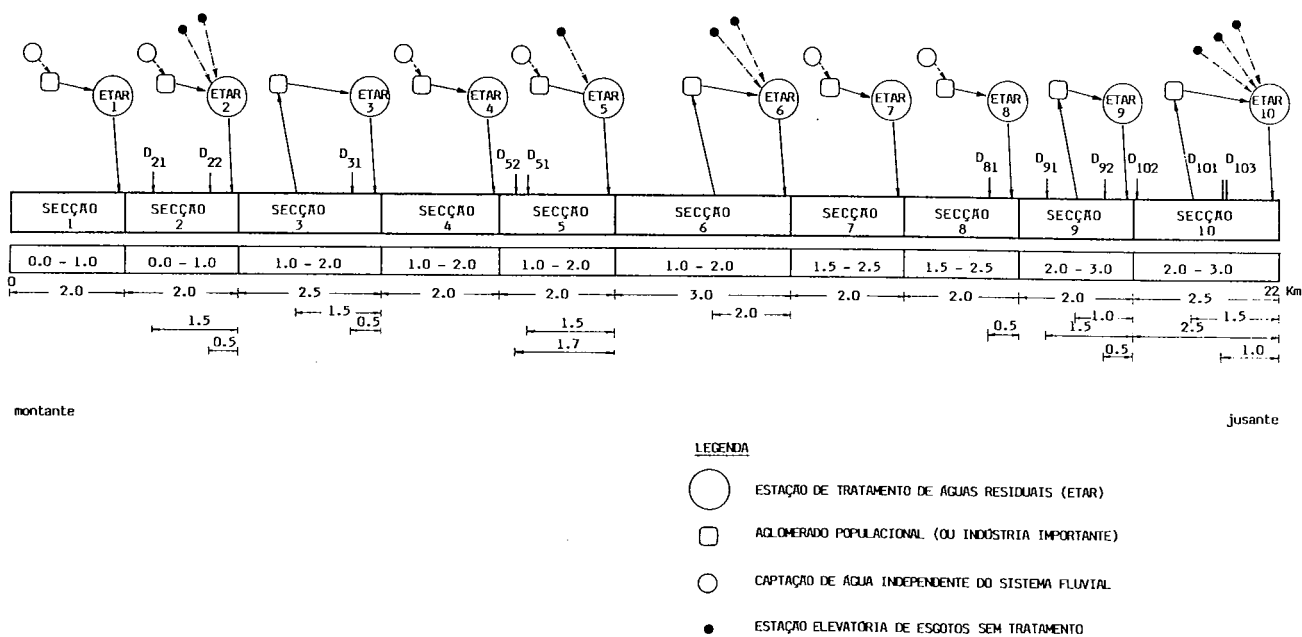


Fig. 3 - Bases de planeamento para o rio Branco. Caso de rio sem afluentes

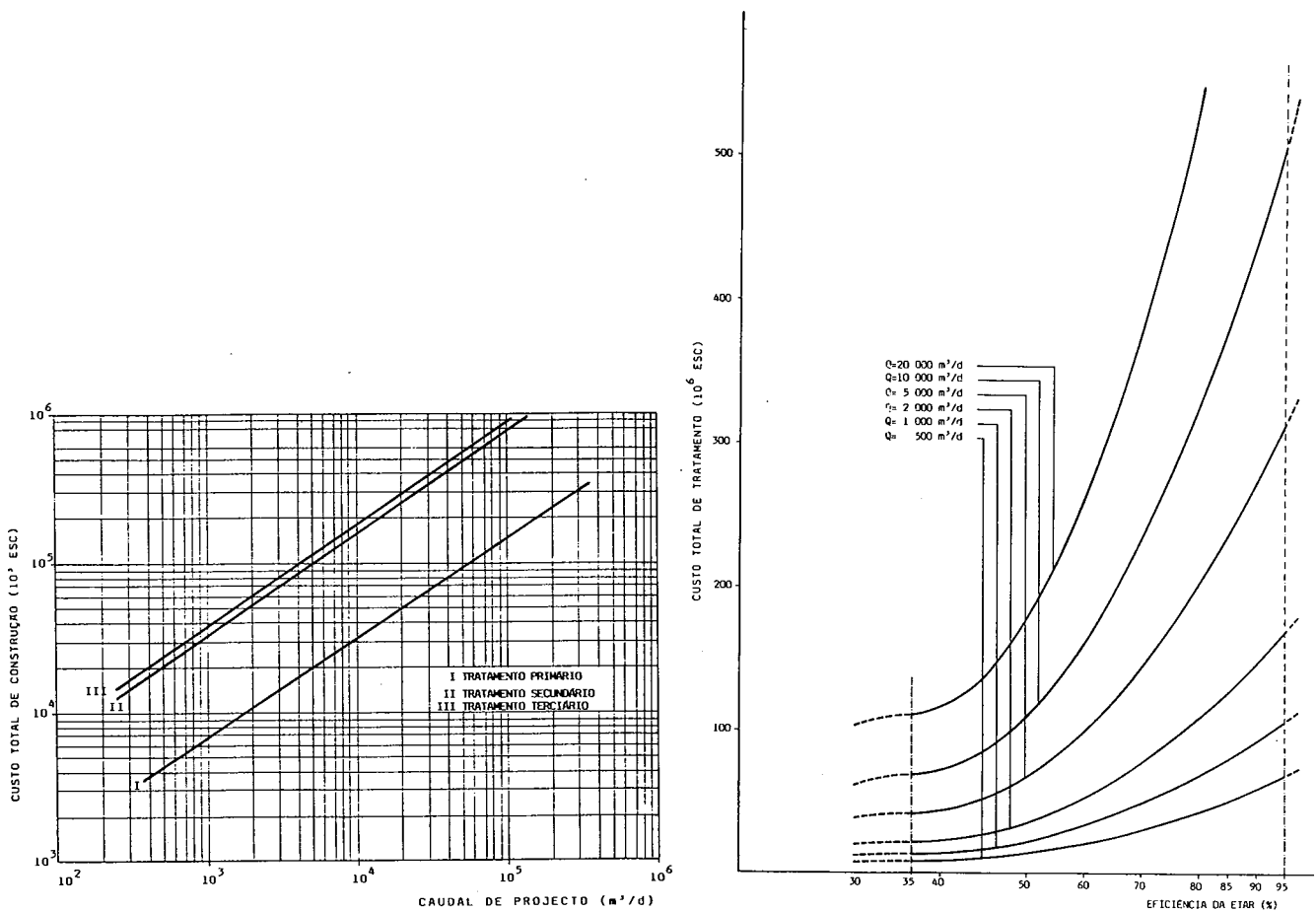


Fig. 4 - Custo total de tratamento para o processo de leitos percoladores

5. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Dos vários resultados do modelo, podem retirar-se algumas conclusões:

a) Os custos totais actualizados nas várias políticas simuladas (não variando os parametros base de projecto) apresentam um valor mínimo na Opção 1 e um valor máximo na Opção 2. Esta constatação confirma a expectativa obvia de que se deve encontrar uma política de menores custos sempre que seja possível estabelecer, em projecto, o tipo e localização dos vários esquemas de transporte e tratamento;

b) Alterando os limites de variação de CBO nos vários estágios, encontram-se trajectórias optimas diferentes da obtida na simulação base. Constata-se que o custo total actualizado das soluções diminui sempre que se eleva o nível permitido de CBO nas águas superficiais, implicando portanto, uma diminuição dos níveis de tratamento exigidos nas ETAR;

c) Os custos de tubagens e elevação de esgotos mostraram-se irrelevantes no comportamento do custo total actualizado nas várias simulações efectuadas. Contudo, outros factores, como o custo de energia, salários, taxas de juro e caudal do rio mostraram ter, em cada alternativa, uma influência significativa tanto no custo, como no esquema de tratamento a adoptar. Neste contexto a adopção de leitos percoladores (ETAR tipo 2) é nitidamente favorecida relativamente a lamas activadas (ETAR tipo 1).

QUADRO 1 - Exemplo de saída de dados e resultados. Opção 1

OPCAO SIMULADA 1

NESTA OPCAO O MODELO DEFINE UMA ESTRATEGIA OPTIMA DE IMPLANTACAO DE ETAR DOS TIPOS SIMULADOS, PARA A BACIA HIDROGRAFICA

IDENTIFICACAO POR SECCOES DA BACIA HIDROGRAFICA

	FONTE	FOZ	AFLUENCIA
RIO PRINCIPAL	1	10	

LIMITES DA VARIÁVEL DE ESTADO (BOD) (mg/L)

SECCAO	BOD MAX	BOD MIN	BODMAX FOZ	BODMIN FOZ	DIM GRELHA
1	1.00	.00			
2	1.00	.00			
3	2.00	1.00			
4	2.00	1.00			
5	2.00	1.00			
6	2.00	1.00			
7	2.50	1.50			
8	2.50	1.50			
9	3.00	2.00			
10	3.00	2.00	2.50	2.00	.05

POLITICA OPTIMA - CUSTOS DE INVESTIMENTO (CONTOS)

ESTAGIO	CT.ETAR	CT.ELEVAT	CT.ETAG
1	138737.	0.	C.
2	216333.	705.	C.
3	501003.	0.	C.
4	185167.	0.	C.
5	201460.	499.	C.
6	1843462.	0.	C.
7	482515.	1289.	C.
8	112868.	0.	C.
9	612228.	0.	C.
10	74233.	1734.	0.
TOTAL	4368007.	4226.	C.

CUSTO DE INVESTIMENTO TOTAL 4372233.

POLITICA OPTIMA - CUSTOS TOTAIS (CONTOS)

ESTAGIO	CT.ETAR	CT.ELVAT	CT.ETAG	EFIC.ETAR	ESTA.800	TP ETAR
1	129522.	0.	0.	.487	.25 .24 .50	2
2	176963.	59677.	0.	.512	.50 .58 1.00	2
3	875279.	0.	0.	.763	1.00 1.02 1.30	2
4	309571.	0.	0.	.740	1.30 1.27 1.30	2
5	186941.	23527.	0.	.602	1.30 1.36 1.45	2
6	5603872.	0.	0.	.957	1.45 1.40 1.95	2
7	979492.	45235.	0.	.804	1.95 1.91 2.10	2
8	97337.	0.	0.	.555	2.10 2.10 2.15	2
9	1444092.	0.	0.	.853	2.15 2.19 2.35	2
10	101275.	58276.	0.	.435	2.35 2.43 2.50	2
TOTAL	9904344.	186716.	0.			

CUSTO TOTAL DA POLITICA SIMULADA 10091040.

QUADRO 2 - Exemplo de saída de dados e resultados. Opção 2

OPCAO SIMULADA 2								
NESTA OPCAO O MODELO DEFINE UMA ESTRATEGIA DE FUNCIONAMENTO DE CUSTO MINIMO PARA O SISTEMA DE ETAR JA DEFINIDO OU IMPLANTADO NA BACIA HIDROGRAFICA								
IDENTIFICACAO POR SECCOES DA BACIA HIDROGRAFICA								
	FORTE	FOZ	AFLUENCIA					
RIO PRINCIPAL	1	10						
LIMITES DA VARIAVEL DE ESTADO (BOD) (mg/L)								
SECCAO	BOD MAX	BOD MIN	BODHAX FOZ	BODMIN FOZ	DIM GRELHA			
1	1.00	.00						
2	1.00	.00						
3	2.00	1.00						
4	2.00	1.00						
5	2.00	1.00						
6	2.00	1.00						
7	2.50	1.50						
8	2.50	1.50						
9	3.00	2.00						
10	3.00	2.00	2.50	2.00	.05			
POLITICA OPTIMA - CUSTOS DE INVESTIMENTO (CONTOS)								
ESTAGIO	CT.ETAR	CT.ELEVAT		CT.ETAG				
1	144506.	0.		0.				
2	227639.	705.		0.				
3	557175.	0.		0.				
4	185167.	0.		0.				
5	215369.	499.		0.				
6	2150788.	0.		0.				
7	538983.	1289.		0.				
8	112868.	0.		0.				
9	691301.	0.		0.				
10	76007.	1734.		0.				
TOTAL	4899803.	4226.		0.				
CUSTO DE INVESTIMENTO TOTAL		4904029.						
POLITICA OPTIMA - CUSTOS TOTAIS (CONTOS)								
ESTAGIO	CT.ETAR	CT.ELEVAT	CT.ETAG	EFIC.ETAR	ESTA.BOD			TP ETAR
1	140650.	0.	0.	.487	.25	.24	.50	1
2	205910.	59677.	0.	.512	.50	.58	1.00	1
3	1031462.	0.	0.	.763	1.00	1.02	1.30	1
4	309571.	0.	0.	.740	1.30	1.27	1.30	2
5	218230.	23527.	0.	.602	1.30	1.36	1.45	1
6	6583180.	0.	0.	.957	1.45	1.40	1.95	1
7	1126047.	45235.	0.	.804	1.95	1.91	2.10	1
8	97337.	0.	0.	.555	2.10	2.10	2.15	2
9	1655694.	0.	0.	.853	2.15	2.19	2.35	1
10	102568.	58276.	0.	.435	2.35	2.43	2.50	1
TOTAL	11470649.	186716.	0.					
CUSTO TOTAL DA POLITICA SIMULADA			11657365.					

QUADRO 3 - Exemplo de saída de dados e resultados. Opção 3

OPCAO SIMULADA 3

NESTA OPCAO O MODELO DEFINE UMA ESTRATEGIA DE IMPLANTACAO DE NOVAS ETAR TENDO COMO CONDICIONANTES AS ETAR QUE CONSTITUEM O SISTEMA A AMPLIAR, EM FUNCIONAMENTO NA BACIA MICROGRAFICA

IDENTIFICACAO POR SECCOES DA BACIA HIDROGRAFICA

	FONTE	FOZ	AFLUENCIA
RIO PRINCIPAL	1	10	

LIMITES DA VARIAVEL DE ESTADO (BOD) (mg/L)

SECCAO	BOD MAX	BOD MIN	BODMAX FOZ	BODMIN FOZ	DIM GRELHA
1	1.00	.00			
2	1.00	.00			
3	2.00	1.00			
4	2.00	1.00			
5	2.00	1.00			
6	2.00	1.00			
7	2.50	1.50			
8	2.50	1.50			
9	3.00	2.00			
10	3.00	2.00	2.50	2.00	.05

POLITICA OPTIMA - CUSTOS DE INVESTIMENTO (CONTCS)

ESTAGIO	CT.ETAR	CT.ELEVAT	CT.ETAG
1	144506.	0.	0.
2	216333.	705.	0.
3	557175.	0.	0.
4	185167.	0.	0.
5	215369.	499.	0.
6	1843462.	0.	0.
7	538993.	1289.	0.
8	112868.	0.	0.
9	691301.	0.	0.
10	76007.	1734.	0.
TOTAL	4581170.	4226.	0.
CUSTO DE INVESTIMENTO TOTAL		4585396.	

POLITICA OPTIMA - CUSTOS TOTAIS (CONTCS)

ESTAGIO	CT.ETAR	CT.ELVAT	CT.ETAG	EFIC.ETAR	ESTA.BOD	TP ETAR
1	140650.	0.	0.	.437	.25 .24 .50	1
2	176963.	59677.	0.	.512	.50 .53 1.00	2
3	1031462.	0.	0.	.763	1.00 1.02 1.30	1
4	309571.	0.	0.	.740	1.30 1.27 1.30	2
5	218230.	23527.	0.	.602	1.30 1.36 1.45	1
6	5603872.	0.	0.	.957	1.45 1.40 1.95	2
7	1126047.	45235.	0.	.804	1.95 1.91 2.10	1
8	97337.	0.	0.	.555	2.10 2.10 2.15	2
9	1655694.	0.	0.	.853	2.15 2.19 2.35	1
10	102568.	58276.	0.	.435	2.35 2.43 2.50	1
TOTAL	10462394.	186716.	0.			
CUSTO TOTAL DA POLITICA SIMULADA				10649110.		

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BELLMAN R.E.; DREYFUS S.E., 1962 - Applied Dynamic Programming. Princeton University Press, Princeton.

VIEIRA J.M.P., 1986 - Modelação Matemática em Gestão da Qualidade das Águas Superficiais. Tese de Doutoramento. Universidade do Minho.

VIEIRA J.M.P., 1987 - A Dynamic Programming Model for River Water Quality Management. Second Internat. Conference of Education, Practice and Promotion of Computational Methods in Engineering Using Small Computers. Guangzhou, China.

VIEIRA J.M.P.; LIJKLEMA L., 1988 - Regional Water Quality Management Model. (em publicação).