

APLICAÇÃO COMBINADA DE TÉCNICAS DE OTIMIZAÇÃO E DE MODELAGEM DE QUALIDADE DE ÁGUA NO PROCESSO DE SELEÇÃO DE SISTEMAS DE TRATAMENTO DE ESGOTOS

Juliana Pereira Louzada Valory^{1*}; *Vinícius Gama Valory Frauches*²; *José Antônio Tosta dos Reis*³; *Antônio Sérgio Ferreira Mendonça*⁴

Resumo – A disposição final de efluentes domésticos brutos em corpos d’água representa um dos principais problemas de degradação ambiental, constituindo a implantação/ operação de estações de tratamento de esgotos a mais usual medida de controle. O processo de seleção de estações de tratamento de esgoto é complexo quando observado do ponto de vista de uma bacia hidrográfica, com múltiplos lançamentos, de diferentes cargas, em corpos d’água com diferentes capacidades de assimilação. Neste contexto, novas metodologias e ferramentas tem sido desenvolvidas para oferecer adequado suporte ao processo decisório associado à seleção de sistemas de controle compostos por ETE’s, em bacias hidrográficas. O presente trabalho tem por objetivo combinar um modelo de qualidade de água e técnicas de otimização (Algoritmo Genético e Programação Não Linear), como alternativa metodológica para o processo de seleção de ETE’s. Foi desenvolvido um modelo de otimização que buscou minimizar o somatório de eficiências de tratamento no âmbito de uma bacia hidrográfica, respeitando restrições de ordem ambiental. Um algoritmo de busca exaustiva foi implementado com o objetivo de avaliar as eficiências estimadas. As técnicas de otimização estimaram eficiências de remoção de matéria orgânica muito próximas daquelas estimadas pelo algoritmo de Busca Exaustiva, e num menor tempo de processamento computacional.

Palavras-Chave – Otimização, modelo de qualidade de água, tratamento de esgoto.

COMBINED APPLICATION OF OPTIMIZATION TECHNIQUES AND MODELING OF WATER QUALITY FOR THE SELECTION WASTEWATER TREATMENT SYSTEMS

Abstract – The disposal of raw sewage into water bodies causes a major environmental problem. Design, building and operation of wastewater treatment plants have been the most usual steps for solving this problem. The selection of wastewater treatment plants becomes more complex when analyzed from a watershed point of view, considering multiple discharges of different loads into water bodies presenting different self-purification capabilities. In this context, new tools and methodologies have been developed to provide adequate support to the decision-making process for selecting wastewater treatment plants systems. This work aims to combine water quality model and optimization technique (Genetics Algorithms and Non Linear Programming) as an alternative methodology for the selection wastewater treatment systems. The optimization models were combined in order to reach minimum sum of efficiencies of treatment within a watershed and comply with environmental constraints. An exhaustive search algorithm was implemented to

¹ *Departamento de Engenharia Ambiental. Universidade Federal do Espírito Santo, campus Goiabeiras. Av Fernando Ferrari, 514, Goiabeiras, Vitória, ES. CEP: 29.075-910. Telefone: (27) 4009-2648. e-mail: julianaplouzada@gmail.com.

² Departamento de Informática. Universidade Federal do Espírito Santo, campus Goiabeiras. Av Fernando Ferrari, 514, Goiabeiras, Vitória, ES. CEP: 29.075-910. Telefone: (27) 4009-2679. e-mail: vgfvini@gmail.com.

³ Departamento de Engenharia Ambiental. Universidade Federal do Espírito Santo, campus Goiabeiras. Av Fernando Ferrari, 514, Goiabeiras, Vitória, ES. CEP: 29.075-910. Telefone: (27) 4009-2648. e-mail: jatreis@gmail.com.

⁴ Departamento de Engenharia Ambiental. Universidade Federal do Espírito Santo, campus Goiabeiras. Av Fernando Ferrari, 514, Goiabeiras, Vitória, ES. CEP: 29.075-910. Telefone: (27) 4009-2648. e-mail: anserfm@terra.com.br.

evaluate the efficiencies estimated. The use of optimization techniques made possible to estimate organic matter removal efficiencies very close to those estimated by the Exhaustive Search algorithm in a much shorter computer processing time.

Keywords – Optimization, water quality model, wastewater treatment.

INTRODUÇÃO

A disposição final de efluentes domésticos brutos em corpos d'água representa um dos principais problemas de degradação ambiental, constituindo a implantação/operação de estações de tratamento de esgotos a mais usual medida de controle. A seleção de uma estação de tratamento de esgoto torna-se complexo quando observado do ponto de vista de uma bacia hidrográfica, com múltiplos lançamentos, de diferentes cargas, em corpos d'água com diferentes capacidades de assimilação. Neste contexto, a avaliação individual (do ponto de vista da outorga ou do licenciamento ambiental) torna-se invariavelmente inconsistente e ganha relevância o emprego, de maneira combinada, de técnicas de otimização e de modelos de simulação de qualidade de água para a seleção dos sistemas de tratamento de esgotos.

Várias técnicas têm sido usadas para resolver problemas de otimização em recursos hídricos. Segundo Aras (2007) e Cho (2004), métodos de programação matemática convencionais, como a Programação Linear (PL), Programação Não Linear (PNL), Programação Dinâmica (PD), têm sido recorrentemente usados para resolver problemas de minimização de custo em sistemas de tratamento de esgoto. A PNL, por exemplo, tem como principais métodos as técnicas de busca numérica, um processo de iteração fundamentado em resultados passados que origina novos resultados a cada passo. De acordo com Albertini (2006) a principal limitação em aplicar a PNL nos problemas de gerenciamento dos recursos hídricos é que o método não distingue necessariamente o ótimo local do ótimo global.

Em função das limitações existentes nos métodos convencionais e pelo vertiginoso desenvolvimento de computadores e softwares, novas técnicas de otimização, como a Lógica Fuzzy, Redes Neurais Artificiais, Algoritmo Genético, “Simulated Annealing” e “Ant Colony Algorithms” tem sido empregadas para a solução de problemas de otimização (ALBERTINI *et al.*, 2006).

Segundo Lacerda e Carvalho (1999), o Algoritmo Genético, um algoritmo de pesquisa para a solução de problemas de otimização estabelecido em meados da década de setenta pelo estudioso americano John Holland, baseia-se numa analogia com a Teoria da Evolução das espécies, estabelecida pelo fisiologista inglês Charles Darwin. Neste algoritmo os indivíduos (possíveis soluções do problema de otimização) evoluem através da aplicação dos operadores genéticos.

O presente trabalho tem como principal finalidade avaliar o uso combinado de técnicas de otimização, Programação Não Linear (PNL) e Algoritmo Genético (AG), com um modelo computacional da qualidade de água no processo de seleção de eficiências mínimas de tratamento de esgotos. O cenário considerado para as simulações no modelo de qualidade de água reproduziu situação hipotética de despejo de efluentes domésticos na bacia hidrográfica do Rio Santa Maria da Vitória, importante manancial de abastecimento da Região Metropolitana da Grande Vitória, ES.

MATERIAIS E MÉTODOS

Área de Estudo

A área de estudo considerada neste trabalho é a porção superior da bacia hidrográfica do Rio Santa Maria da Vitória, no trecho compreendido entre a nascente do curso d'água e a represa de Rio Bonito. É uma das principais bacias responsáveis pelo abastecimento de água da Região Metropolitana da Grande Vitória. A qualidade das águas da bacia do rio Santa Maria da Vitória é um fator de grande importância para o desenvolvimento regional, dado que suas águas são utilizadas para diversos usos, com destaque para o abastecimento público, industrial, irrigação e geração de energia elétrica (Caiado *et al.*, 1999).

Segundo Roques (2006) a bacia do Rio Santa Maria da Vitória apresenta uma área de aproximadamente 616 km² e 42 km de extensão, sendo os rios Alto Posmoser e São Luiz os principais afluentes formadores do rio Santa Maria da Vitória. O rio São Luiz constitui maior fonte de carga orgânica, pois despeja efluentes domésticos, provenientes da sede do município de Santa Maria de Jetibá, sem tratamento adequado, no rio Santa Maria da Vitória.

Modelagem da Qualidade da Água

Para simulação computacional da qualidade d'água do sistema hídrico estudado foi empregado o modelo QUAL-UFGM, desenvolvido no ambiente computacional da planilha eletrônica Microsoft Excel®, detalhadamente apresentado e discutido por Von Sperling (2007).

Para facilitar o emprego de uma das técnicas de otimização considerada neste estudo (o Algoritmo Genético), o referido modelo de qualidade da água numérico foi reproduzido no ambiente do software MatLab

Por meio do modelo de qualidade de água foram simulados, neste estudo, os perfis de concentração da Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) e o Oxigênio Dissolvido (OD), que estão entre os principais constituintes que determinam qualidade da água após despejos de efluentes domésticos.

As constantes cinéticas, informações hidrodinâmicas e de qualidade de água consideradas reproduziram aquelas empregadas por Salim (2004) e Mendonça e Almeida (2005), quando da análise do problema de disposição de efluentes domésticos no mesmo sistema hídrico. A Tabela 01 apresenta as constantes cinéticas e informações fisiográfica e de qualidade de água necessárias à simulação das concentrações de OD e DBO.

Tabela 01: Constantes cinéticas, informações fisiográficas e de qualidade de água requeridas para a simulação dos perfis de concentração de OD e DBO.

Parâmetro	Valor (unidade)
Constante de desoxigenação (K_1)	0,23 dia ⁻¹
Constante de reaeração (K_2)*	$K_2 = 0,90.Q^{-0,04}$
Constante de revolvimento de lodo (S_d)	0
Constante de sedimentação (K_s)	0
Temperatura do rio	21° C
Altitude da bacia	900 m

A temperatura média de (21°C) e altitude média (900 m) no rio Santa Maria da Vitória são informações que subsidiaram a determinação da concentração de saturação de oxigênio no corpo d'água, que por sua vez, assumiu o valor de 8,00 mg/L.

Para as simulações, o curso d'água foi dividido em 42 elementos computacionais de 1 km de extensão cada. O rio Alto Posmoser torna-se um afluente do Rio Santa Maria da Vitória no quilômetro 24, e o rio São Luiz no quilômetro 36. A Tabela 02 apresenta as informações de qualidade e disponibilidade de água do rio Santa Maria da Vitória e de seus principais afluentes.

Tabela 02: Informações quali-quantitativas do rio Santa Maria da Vitória e seus principais afluentes

Curso d'água	Vazão (m ³)	DBO (mg/L)	OD(mg/L)
Rio Santa Maria da Vitória	3,85	2,0	8,0
Rio Alto Posmoser	1,47	2,0	8,0
Rio São Luis	0,36	8,3	2,0

Fonte: Salim (2004)

A conformação do cenário de simulação da qualidade de água foi estabelecida a partir de diferentes pontos de disposição de esgotos domésticos (quilômetros 8, 16, 25, 32 e 40). Nestes pontos assumiu-se a necessidade de disposição final de um efluente com vazão de 40 L/s que, quando bruto, apresentava DBO 350 mg/L e concentração nula de OD

Problema de Otimização

Neste estudo, o problema consistiu em minimizar uma função objetivo da seguinte forma:

$$\text{Minimizar } [f(E)] = \sum_{i=1}^n E_i \quad (01)$$

Sujeito à:

$$DBO_{\text{Esgoto Tratado}} \leq DBO_{\text{Esgoto Bruto}} \quad (02)$$

$$DBO_{\text{Esgoto Tratado}} \geq 0 \quad (03)$$

$$DBO_{\text{Curso d'água}} \leq 5 \text{ mg/L} \quad (04)$$

$$OD_{\text{Curso d'água}} \geq 5 \text{ mg/L} \quad (05)$$

Nas expressões anteriores E é um vetor contendo as n variáveis de decisão, o termo E_i representa a eficiência do i -ésimo sistema de tratamento de esgotos considerado para a bacia em estudo, $OD_{\text{Curso D'água}}$ a concentração de Oxigênio Dissolvido no curso d'água e $DBO_{\text{Esgoto Tratado}}$, $DBO_{\text{Esgoto Bruto}}$ e $DBO_{\text{Curso D'água}}$ os valores de Demanda Bioquímica de Oxigênio para o esgoto tratado, esgoto bruto e curso d'água, respectivamente.

De acordo com o que estabelece a Resolução CONAMA nº 357/2005, os padrões de qualidade estabelecidos para DBO e OD em cursos d'água classe II (classe a qual pertence o rio Santa Maria da Vitória no trecho analisado) deram forma às restrições definidas pelas expressões (04) e (05). Adicionalmente às restrições estabelecidas pelas inequações de (02) a (05), foram adotados para E_i os limites máximo e mínimo de 90% e 0%, respectivamente.

Para solução do referido problema de otimização com a PNL foi utilizado o programa SOLVER, disponível pela planilha eletrônica Microsoft Excel. O SOLVER utiliza um algoritmo de otimização denominado GRG2, baseado na técnica de gradientes reduzidos generalizados.

Para a solução do problema de otimização com o AG implementou-se um modelo matemático de qualidade de água no software MatLab, por meio do qual foi possível a conexão com

o toolbox de otimização do Algoritmo Genético. O indivíduo, neste trabalho, representou um vetor de números reais cujas posições representam eficiências a serem estimadas para cada sistema de tratamento de esgoto eventualmente proposto para a bacia. A Tabela 03 apresenta os operadores e parâmetros genéticos utilizados no AG para a obtenção da solução ótima.

Tabela 03 - Operados e parâmetros genéticos aplicados no Algoritmo

Parâmetro / Operador	Valor / Tipo
Tamanho da População Inicial	300 indivíduos
Seleção	Torneio (grupos de 10 indivíduos)
Crossover	Aritmético
Mutação	<i>Adaptive feasible</i>
Taxa Crossover	50%
Elitismo	3 indivíduos
Critério de parada	100 Gerações ou convergência dos resultados

Na seleção por torneio foram escolhidos, aleatoriamente, dez indivíduos, na população inicial e, dentre estes, o que apresentou maior *fitness* foi selecionado para a população intermediária. Os indivíduos da população intermediária reproduziram-se entre si para gerar uma nova população de filhos com o mesmo tamanho da população inicial. Esse cruzamento se deu com a aplicação da taxa de *crossover* e com o tipo de mutação especificadas na Tabela 03. A técnica do Elitismo foi aplicada reintroduzindo-se três dos melhores pais na população subsequente.

Para a determinação do ótimo global do problema de otimização, a partir do qual foi possível a avaliação dos resultados produzidos com a aplicação da PNL e AG, desenvolveu-se um algoritmo de Busca Exaustiva, capaz de varrer todas as possibilidades de valores de eficiência de tratamento associadas a cada cenário.

O modelo de otimização proposto foi implementado em computadores Intel Dual-Core 1,60 GHz com 2,93 GB de memória RAM e Intel Core i5 2,60 GHz com 8 GB de memória RAM.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 4 apresenta as eficiências de tratamento de esgoto estimadas para o sistema hídrico determinado a partir da aplicação das técnicas de otimização.

Tabela 4 – Eficiências estimadas após aplicação de técnicas de otimização

Técnicas de Otimização	P_1	P_2	P_3	P_4	P_5	\sum Eficiências	Tempo de processamento (s)
BUSCA EXAUSTIVA ¹	8	82	48	82	87	307	$6,26 \times 10^5$
AG ²	31	60	77	77	67	312	54
PNL ²	10	81	48	82	88	310	Instantâneo

¹ Intel Core i5 2,60 GHz e 8 GB de memória RAM.

² Intel Dual-Core 1,60 GHz e 2,93 GB de memória RAM

Embora os resultados obtidos neste trabalho utilizando três técnicas de otimização tenham se apresentado substancialmente próximos quanto ao somatório de eficiências, o mesmo comportamento quanto ao tempo de processamento não foi verificado. O algoritmo de Busca

Exaustiva demandou tempos substancialmente maiores do que aqueles requeridos pelo AG e pela PNL.

A partir dos resultados apresentados na Tabela 4, pôde-se concluir que, para determinação de uma solução ótima, a utilização de técnicas de otimização alternativamente à otimização por Busca Exaustiva torna-se conveniente quando analisados problemas muito complexos, que poderiam demandar tempos de processamento inviáveis para a determinação de uma solução ótima global. Do ponto de vista da seleção de sistemas de tratamento de esgotos, as diferenças percentuais entre os somatórios de eficiências podem ser desprezadas, uma vez que diferenças da ordem de 5% não seriam suficientes para produzir decisões muito diferenciadas quanto aos níveis de tratamento e aos possíveis de sistemas de tratamento de esgoto a serem implementados.

Os resultados do problema proposto obtidos a partir da aplicação da PNL apresentaram-se mais interessantes do ponto de vista da qualidade da resposta (quando comparada com as correspondentes à AG) e quanto ao tempo de processamento (quando comparado com os correspondentes às demais técnicas). No entanto, quando da análise de sistemas muito complexos, como em bacias com múltiplos lançamentos e captações, com disposição de cargas difusas e com diferentes condições de assimilação dos efluentes ao longo do sistema hídrico, sua aplicação pode ser comprometida devido ao fato de que seu método de busca iterativo é baseado em soluções pretéritas.

As figuras 1 e 2 apresentam, respectivamente, o perfil de DBO e OD, associados ao cenário de disposição de efluentes considerado .

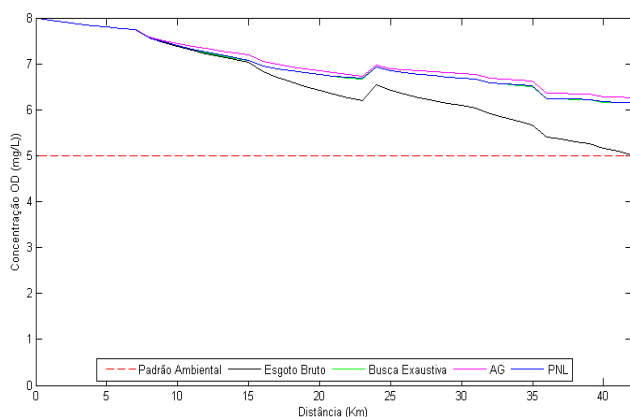


Figura 1: Perfil de OD associado ao cenário A, após resolução do problema de otimização.

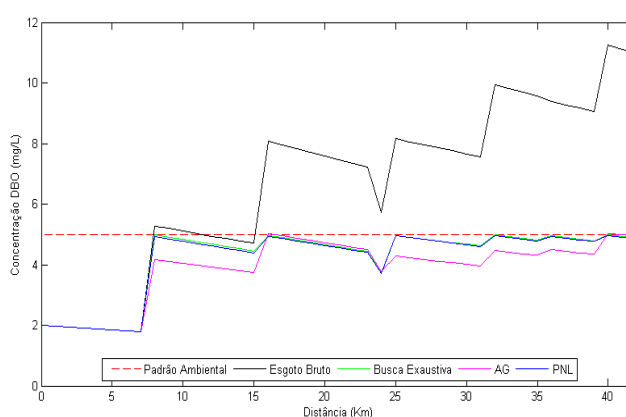


Figura 2: Perfil de OD associado ao cenário A, após resolução do problema de otimização

Observa-se nas figuras 1 e 2 que no caso de disposição final de efluentes brutos, as concentrações de DBO infringiriam os padrões estabelecidos pela Resolução CONAMA nº 357/2005. As concentrações de OD, por sua vez, atenderiam aos padrões de qualidade ambiental quando assumidas as condições de contorno estabelecidas no cenário de simulação considerado.

Com a implantação/operação de estações de tratamento apresentando eficiências estimadas com o auxílio das diferentes técnicas de otimização empregadas neste estudo, todos os trechos do rio apresentariam concentrações de OD e DBO atendendo os padrões de qualidade de água considerados.

CONCLUSÃO

As conclusões obtidas neste trabalho podem ser assim sumarizadas:

- A partir da aplicação do modelo de otimização proposto foi possível estimar eficiências mínimas para sistemas de tratamento de esgotos associados à porção superior do rio Santa Maria da Vitória. Os sistemas propostos, se eventualmente implantados e operados adequadamente, permitiriam a manutenção dos padrões de qualidade referentes à demanda bioquímica de oxigênio e ao oxigênio dissolvido ao longo de toda a extensão do curso d'água objeto de estudo, para as condições de carga e capacidades de autodepuração consideradas.
- A utilização do método de Busca Exaustiva permitiu a obtenção da solução ótima global do problema estudado. Os resultados obtidos com auxílio do Algoritmo Genético e da PNL foram muito próximos daqueles obtidos com auxílio do Método de Busca Exaustiva, tendo sido alcançados em tempo de processamento computacional substancialmente menor.

REFERÊNCIAS

ALBERTINI, L. L.; MAUAD, F.F; DANIEL, L. A. (2006). Uso de Simulação Computacional para Planejamento de um Sistema Hídrico: Estudo de Caso Qualitativo e Quantitativo. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*. Vol 11, n.4, pp. 209-219.

ARAS, E; TOGAN, V. BERKUN,M. (2007) River water quality management model using genetic algorithm. *Enviromental Fluidic Mechanical*. Vol 7.pp 439-450.

BRASIL. Resolução CONAMA nº 357, de 17 de março de 2005. *Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil*, Brasília, 17 mar. 2005.

CAIADO, M. A. C., MENDONÇA, A. S. F., LUPPI, S. M., TEIXEIRA, E. C. (1999). Desenvolvimento Regional e Qualidade das Águas da Bacia do Rio Santa Maria da Vitória .In: Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, XIII. In *Anais XIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*, Belo Horizonte.

CHO, J. H., SUNG, K. S.,HA, S. R. (2004). A river water quality management model for optimising regional wastewater treatment using a genetic algorithm. *Journal Environment Management*,73 (3), pp .229–242.

LACERDA, E. G. M. de; CARVALHO, A. C. P. L. F. (1999). Introdução aos algoritmos genéticos. In: *Sistemas inteligentes: aplicações a recursos hídricos e ciências ambientais*: Org. por Galvão, C. de O. e Valença, M.J.S. ed. Universidade/UFRGS, Porto Alegre-RS, pp. 99-150

MENDONÇA, A.S.F.; ALMEIDA, M.M. (2005) Definição de alternativas de eficiências de tratamento de efluentes para manutenção de padrões ambientais. In: *Anais do XVI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*, João Pessoa; pp.501-510.

ROQUES, T. V. P. *Aplicação de Modelos Computacionais na Análise de Outorga para diluição de efluentes em corpos d'água*: Fontes Pontuais e Difusas. 2006. Dissertação (Mestrado em

Engenharia Ambiental) - Programa de Pós Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2006.

SALIM, F.P.C. *Desenvolvimento de sistema de suporte a decisão para o gerenciamento da qualidade das águas em rios considerando múltiplas fontes de poluição pontual*. 2004. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Programa de Pós Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória 2004.

VON SPERLING. *Princípios do tratamento biológico de águas residuárias – Estudos e modelagem da qualidade da água de rios*. Belo Horizonte, DESA/UFMG. pp. 588 . 2007.

ZAMPROGNO, D.P. (1999). *Subsídio para a definição de locais apropriados para a implantação de reservatórios de regularização de vazões: refinamento e aplicação de procedimento metodológico*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental). Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 1999.