

IV-236 - SELEÇÃO DE EFICIÊNCIAS DE TRATAMENTO DE EFLUENTES NO ÂMBITO DE BACIAS HIDROGRÁFICAS A PARTIR DO EMPREGO DA PROGRAMAÇÃO NÃO-LINEAR E DE MODELO MATEMÁTICO DE QUALIDADE DE ÁGUA

Stjephan Jerico Popovic Otarola ⁽¹⁾

Graduanda em Engenharia Ambiental pela Universidade Federal do Espírito Santo.

José Antônio Tosta dos Reis ⁽²⁾

Professor do Departamento de Engenharia Ambiental da Universidade Federal do Espírito Santo.

Endereço ⁽¹⁾: Departamento de Engenharia Ambiental. Universidade Federal do Espírito Santo, campus Goiabeiras. Av. Fernando Ferrari, 514, Goiabeiras, Vitória, ES. CEP: 29.075-910. stefan_jpo@hotmail.com.

RESUMO

A tomada de decisão dos níveis de tratamento das estações de tratamento constitui tarefa complexa no âmbito de uma bacia hidrográfica, onde habitualmente existem múltiplos lançamentos e captações e cursos d'água com diferentes capacidades de autodepuração. Neste contexto, o objetivo do presente trabalho é estudar o processo de seleção de eficiências para estações de tratamento de esgotos no âmbito de uma bacia hidrográfica a partir da aplicação combinada da Programação Não Linear e de modelo matemático de qualidade de água, avaliando a resposta de diferentes modelos de otimização. O estudo foi conduzido a partir de uma possível situação de disposição de efluentes na porção superior da bacia hidrográfica do rio Santa Maria da Vitória, curso d'água de domínio do estado do Espírito Santo responsável por grande parte do abastecimento de água da Região Metropolitana da Grande Vitória. Os resultados indicaram que os diferentes de otimização conformaram alternativas versáteis para a seleção de eficiências de tratamento de esgotos, podendo ser aplicados como suporte para seleção de sistemas de tratamento de esgotos a serem implantados no âmbito de uma bacia hidrográfica

PALAVRAS-CHAVE: Tratamento de esgotos, seleção, otimização, Programação Não Linear.

INTRODUÇÃO

A poluição dos corpos d'água superficiais, quer de forma concentrada, como na disposição final de esgotos domésticos ou industriais, quer de uma forma difusa, decorrente da aplicação de defensivos agrícolas no solo, pode comprometer o adequado aproveitamento das águas de rios e lagos. Após as alterações induzidas pelos despejos, um conjunto de processos físicos, químicos e biológicos se estabelece no corpo d'água, buscando restabelecer o equilíbrio do meio aquático. Este conjunto de processos é usualmente denominado autodepuração.

Dois outros relevantes aspectos devem ser considerados quando da seleção de sistemas de tratamento de esgotos: 1º ainda que no País comece a ganhar forma o estabelecimento das parcerias entre poder público e iniciativa privada e a privatização de sistemas de esgotamento sanitário, a oferta dos serviços de saneamento constitui obrigação fundamental do poder público. Neste sentido, quaisquer economias geradas com a implantação ou operação dos sistemas de tratamento de esgotos pode permitir que outros serviços públicos sejam aprimorados em decorrência de eventuais remanejamentos de recursos; 2º pelo princípio do usuário-pagador, aqueles lançamentos que estabelecerem maior pressão sobre os recursos hídricos devem exigir maiores esforços de tratamento.

Do ponto de vista ambiental, a capacidade suporte dos corpos d'água constitui aspecto central para o processo de seleção. Sempre que adequadamente considerada, a capacidade de assimilação de corpos d'água permite a seleção de plantas de tratamento mais simples (construtiva e operacionalmente) e economicamente mais acessíveis.

A compreensão e quantificação da capacidade de autodepuração de um rio condiciona a qualidade dos efluentes, permitindo a definição do lançamento de cargas poluentes compatíveis com a capacidade suporte do corpo d'água. Neste contexto, a consideração da capacidade de autodepuração dos cursos d'água permite o adequado projeto de plantas de uma Estação de Tratamento de Esgotos.

Neste contexto, o emprego combinado de técnicas de otimização e da modelagem matemática da qualidade da água pode apresentar-se como alternativa interessante, constituindo ferramenta que auxilia a seleção ou o escalonamento da implantação de sistemas de tratamento de esgotos. São exemplos desta abordagem os trabalhos de Han et al. (2011), Saadatpour e Afshar (2007) e Burn (1989).

O objetivo principal do presente trabalho foi estabelecer, para o âmbito de uma bacia hidrográfica, eficiências mínimas de tratamento de esgotos. Para a condução do processo de seleção de eficiências foram empregados, de maneira combinada, modelo matemático de qualidade de água e a Programação Não Linear (PNL). O cenário considerado para as simulações de qualidade de água considerou o despejo de efluentes domésticos na porção superior da bacia hidrográfica do Rio Santa Maria da Vitória, importante manancial para o abastecimento da Região Metropolitana da Grande Vitória, ES.

MATERIAIS E MÉTODOS

Modelo de Qualidade de Água

Para simulação computacional da qualidade d'água do sistema hídrico estudado foi empregado o modelo QUAL-UFGM, modelo desenvolvido no ambiente computacional da planilha eletrônica Microsoft Excel® (VON SPERLING, 2007).

No modelo QUAL-UFGM, o rio é conceitualmente segmentado em trechos que, por sua vez, podem ser divididos em sub-trechos ou elementos computacionais. Estes elementos computacionais possuem comprimentos constantes e são considerados como completamente misturados. Os trechos, portanto, podem ser entendidos como grupos de reatores de mistura completa, onde são comuns as características hidrogeométricas e taxas biológicas. Para cada elemento, o balanço de massa pode ser escrito em função da somatória dos fluxos afluentes e efluentes. São considerados o fluxo afluente ao elemento por sua face superior, fluxos referentes às fontes externas ou captações e o fluxo efluente através da face inferior do elemento (von Sperling, 2007).

O QUAL-UFGM possibilita a modelagem da demanda bioquímica de oxigênio, oxigênio dissolvido, nitrogênio total e suas frações, fósforo total e suas frações e coliformes termotolerantes ou E.coli. Contrapondo-se ao QUAL2-K, o QUAL-UFGM possui a simplificação de não incluir as algas e suas inter-relações com os outros constituintes (von Sperling, 2007).

Constantes cinéticas, informações hidrodinâmicas e de qualidade de água

As constantes cinéticas, informações hidrodinâmicas e de qualidade de água foram obtidas a partir do trabalho estabelecido por Salim (2004), quando da análise do problema de disposição de efluentes domésticos no mesmo sistema hídrico (Tabela 01). Os valores de temperatura, altitude e concentração de saturação de oxigênio dissolvido associadas ao rio Santa Maria da Vitória estão reunidos na Tabela 02. Uma representação esquemática do sistema hídrico estudado, incluindo informações sobre qualidade e disponibilidade de água do Rio Santa Maria da Vitória e seus principais afluentes é apresentada por meio da Figura 01.

Tabela 1- Constantes cinéticas associadas ao rio Santa Maria da Vitória.

Constantes Cinéticas	Valores (20°C, dia ⁻¹)	Valores corrigidos em função da temperatura (dia ⁻¹)
K ₁	0,23	0,24
K ₂	0,95	0,98

Tabela 2 - Temperatura, Altitude e concentração de saturação de oxigênio dissolvido associadas ao rio Santa Maria da Vitória.

Parâmetro	Valor
Temperatura	21°C
Oxigênio Dissolvido de saturação	8,0 mg/L
Altitude acima do nível do mar	900m

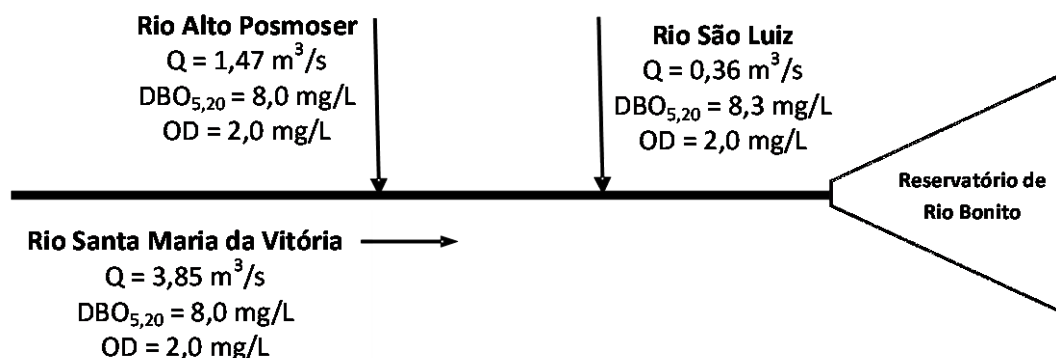


Figura 01 – Diagrama unifilar do sistema hídrico objeto do estudo demonstrativo

Cenário de disposição de efluentes

O cenário de disposição de efluentes considerado no presente estudo foi objeto de análise por Louzada et al (2013), sendo conformado por cinco lançamentos de efluentes com diferentes vazões, decrescentes no sentido da foz da área de estudo (P1 = 60 L/s, P2 = 50 L/s, P3 = 40 L/s, P4 = 30 L/s e P5 = 20 L/s).

Os pontos de lançamento de efluentes foram localizados nos quilômetros 8, 16, 24, 32 e 40 do trecho estudado. Em todas as simulações conduzidas o esgoto bruto apresentava DBO de 350 mg/L e concentração nula de OD.

Programação Não Linear

Neste estudo, a técnica de otimização empregada foi a Programação Não Linear (PNL), técnica aplicável para o tratamento de problemas nos quais a função objetivo e/ou restrições são estabelecidas a partir de funções não lineares. A PNL é detalhadamente apresentada e discutida por Cirilo (2002).

Segundo Yeh (1985), a Programação Não-Linear (PNL) não goza da popularidade que a PL e a PD têm na análise de sistemas de recursos hídricos. O fato é explicado em razão de que o processo de otimização é usualmente lento, requerendo maior tempo de processamento, quando comparado com outros métodos, uma vez que a matemática envolvida nos modelos não lineares é muito mais complicada do que nos casos de programação linear. O desenvolvimento crescente dos recursos computacionais, embora o artifício da linearização ainda seja bastante utilizado, vem facilitando a aplicação da PNL na prática de solução de problemas de sistemas de recursos hídricos, sendo já extensivamente tratada na literatura (SIMONOVIC, 1992).

Segundo Cirilo (2002), a PNL pode ser classificada quanto aos métodos utilizados na solução dos problemas em:

- técnicas analíticas - as soluções ótimas são obtidas pela resolução de sistemas de equações, com apoio de derivadas, podendo a otimização ser reduzida à procura das raízes desses sistemas;
- técnicas de busca numérica - esses métodos usam informações passadas em um processo iterativo, para gerar melhores soluções no processo de otimização. Esse tipo de técnica de otimização permite ainda o emprego de métodos numéricos para resolver problemas dos quais não se conhece a solução analítica.

Neste trabalho, para aplicação da PNL foi empregado 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.

Modelos de Otimização

Conceitualmente, a otimização constitui um processo de busca da melhor solução para um dado problema. Desta forma, busca achar a solução que corresponda ao ponto de mínimo ou de máximo de uma função objetivo.

Neste estudo foram utilizados três diferentes modelos de otimização para a seleção das eficiências de tratamento. São eles:

- Modelo 1

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

Sujeito à:

$$\frac{C_{\text{Esgoto Bruto}}^1}{E_1} = \frac{C_{\text{Esgoto Bruto}}^2}{E_2} = \dots = \frac{C_{\text{Esgoto Bruto}}^i}{E_i} \quad (2)$$

- Modelo 2

$$\text{Minimizar } [f(E)] = \sum_{i=1}^n E_i \quad (3)$$

Sujeito à:

$$\frac{C_{\text{Esgoto Bruto}}^1}{E_1^2} = \frac{C_{\text{Esgoto Bruto}}^2}{E_2^2} = \dots = \frac{C_{\text{Esgoto Bruto}}^i}{E_i^2} \quad (4)$$

- Modelo 3

$$\text{Minimizar } \left[\left| \frac{C_{\text{Esgoto Bruto}}}{\bar{C}_{\text{Esgoto Bruto}}} - \frac{E}{\bar{E}} \right| \right] \quad (5)$$

Nas equações de (1) a (5), E_i representa a eficiência do i -ésimo sistema de tratamento de esgotos considerado para a bacia em estudo, $OD_{\text{Curso da água}}$ a concentração de Oxigênio Dissolvido no curso d'água, $DBO_{\text{Curso da água}}$ o valor de Demanda Bioquímica de Oxigênio d'água e $C_{\text{Esgoto Bruto},i}$ a concentração total de matéria orgânica do i -ésimo sistema de tratamento de esgotos considerado para a bacia em estudo. As expressões (2), (4) e (5) impõem, a partir de diferentes perspectivas, a equidade entre sistemas de tratamento. Além das restrições individuais para cada modelo, os três modelos de otimização estabelecidos incorporaram restrições adicionais representadas pelas inequações (6), (7) e (8).

$$E_i \leq 90 \quad (6)$$

$$DBO_{\text{Curso d'água}} \leq 5,0 \quad (7)$$

$$OD_{\text{Curso d'água}} \geq 5,0 \quad (8)$$

As inequações (6), (7) e (8) foram estabelecidas a partir dos padrões ambientais para rios classe 2, conforme Resolução No 357/2005, do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). A seleção de eficiências de tratamento de efluentes dispostos em rios de diferentes classes de uso envolveria a simples modificação dos padrões estabelecidos pelas referidas inequações.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os gráficos reunidos na Figura 2 apresentam os perfis de concentração de OD e DBO ao longo da porção superior do rio Santa Maria da Vitória, considerando-se a disposição final de efluentes brutos conforme

cenário de disposição de efluentes estabelecido. É relevante observar que, em se considerando a perspectiva de disposição final de efluentes brutos, o padrão estabelecido pela Resolução CONAMA No 357/2005 para DBO em águas doces de classe 2 não seria atendido a partir do quilômetro oito.

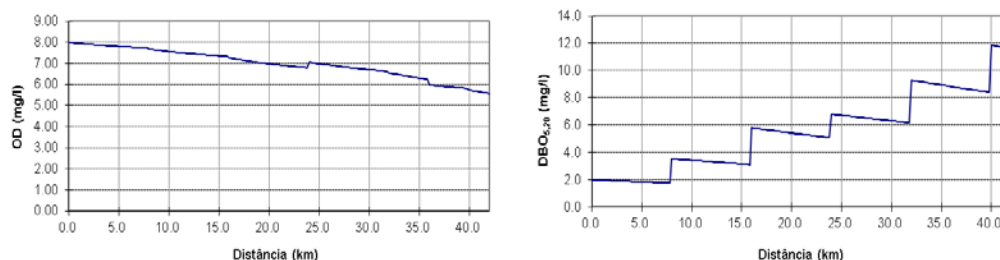


Figura 1 – Perfis de OD e DBO ao longo da porção superior do rio Santa Maria da Vitória considerando a disposição de efluentes brutos.

As mínimas eficiências de remoção de matéria orgânica, requeridas para os diferentes pontos de disposição final de esgotos e estabelecidas com auxílio da PNL para todos os modelos de otimização conformados, estão indicadas na Tabela 3.

Tabela 3 - Eficiências de tratamento de esgotos (em %) estimadas com auxílio da PNL para os modelos de otimização estabelecidos

Modelo de Otimização	Pontos de disposição de efluentes tratados					Σ Eficiências
	P ₁	P ₂	P ₃	P ₄	P ₅	
Modelo 1	29	43	57	72	86	286
Modelo 2	44	54	63	70	77	308
Modelo 3	29	43	58	72	87	289

A partir das eficiências de remoção de matéria orgânica estimadas com auxílio dos diferentes modelos de otimização foram estabelecidos os perfis de concentração de OD e DBO apresentados nas figuras 3, 4 e 5.

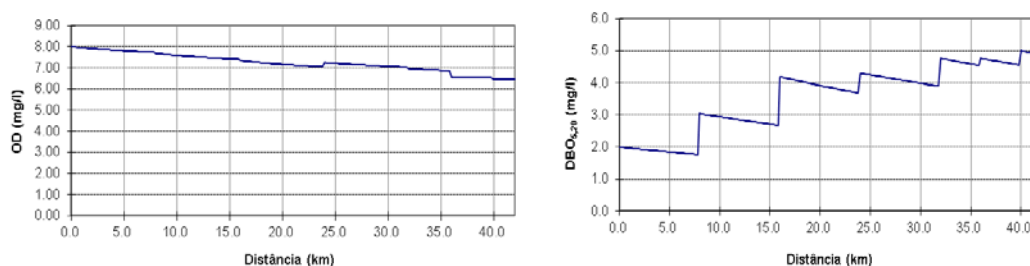


Figura 2 –Perfis de concentração de OD e DBO da porção superior do rio Santa Maria da Vitória considerando as eficiências de remoção de matéria orgânica estimadas com auxílio do Modelo 1.

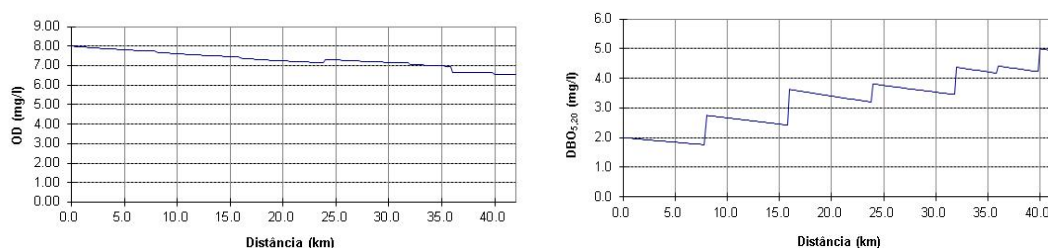


Figura 4 –Perfis de concentração de OD e DBO da porção superior do rio Santa Maria da Vitória considerando as eficiências de remoção de matéria orgânica estimadas com auxílio do Modelo 2.

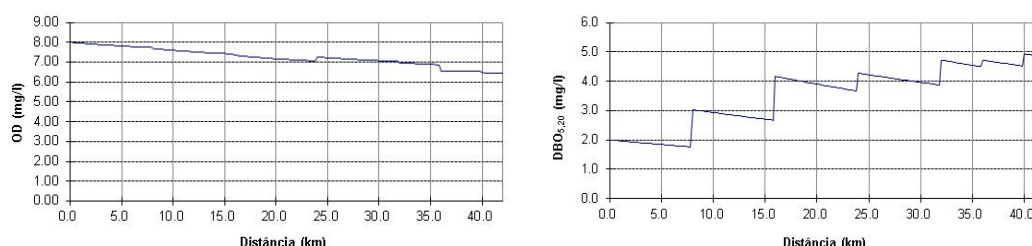


Figura 5 –Perfis de concentração de OD e DBO da porção superior do rio Santa Maria da Vitória considerando as eficiências de remoção de matéria orgânica estimadas com auxílio do Modelo 3.

A partir da simples inspeção dos resultados reunidos na Tabela 1 e dos perfis de OD e DBO associados aos diferentes modelos de otimização, apresentaram-se como relevantes as seguintes observações:

- Como os padrões ambientais figuraram como restrições dos modelos de otimização, para o cenário de disposição de efluentes considerado, os padrões de qualidade para OD e DBO em rios classe 2 foram invariavelmente atendidos;
- Os modelos de otimização 1 e 3 apresentaram resultados semelhantes em relação às eficiências de remoção de matéria orgânica para os diferentes pontos de disposição final de efluentes considerados. No entanto, o Modelo 1 é conceitualmente mais simples e de aplicação mais fácil;
- O segundo modelo de otimização, no qual a equação que impõe a equidade entre lançamento atribui maior relevância à variável eficiência, apresentou o maior somatório de eficiências associadas aos diferentes efluentes. No entanto, as variações nos níveis de tratamento entre os diferentes pontos de disposição de efluentes foi menos acentuada.

CONCLUSÕES

A partir do presente estudo, apresentaram-se como relevantes as seguintes conclusões:

- A combinação de modelo de qualidade de água e técnica de otimização conformou alternativa versátil para a seleção de eficiências, podendo ser aplicada como suporte para a pré-seleção de sistemas de tratamento de esgotos a serem implantados no âmbito de uma bacia hidrográfica;
- Dos modelos de otimização testados, os modelos 1 e 3 apresentaram respostas similares. O modelo 1, no entanto, é mais simples e de mais fácil aplicação;
- O aplicação do segundo modelo de otimização conduziria aos maiores esforços de tratamento no âmbito da bacia hidrográfica estudada. No entanto, por privilegiar a eficiência quando do estabelecimento da relação de equidade, tenderia a tornar menos acentuada a variação entre as eficiências de tratamento associadas aos diferentes pontos de disposição final de efluentes.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. BURN, D. H. Water-quality management through combined simulation-optimization approach. Journal of Environmental Engineering, v.115, n.5, p.1011-1024, 1988.
2. CIRILO, J. A. Programação Não Linear Aplicada à Recursos Hídricos. In: PORTO, R. L. L. (Org.). Técnicas Quantitativas para o Gerenciamento de Recursos Hídricos. Porto Alegre: UFRGS.2002.

3. HAN, Y; HUANG, Y. F.; WANG, G. Q.; MAQSOOD, I. A Multi-objective Linear Programming Model with Interval Parameters for Water Resources Allocation in Dalian City. *Water Resources Management*, v.25, n.2, p.449-463, DOI: 10.1007/s11269-010-9708-7, 2011.
4. LOUZADA, J. P.; REIS, J. A. T.; MENDONÇA, A. S. F. Uso de Otimização e Modelagem de Qualidade de Água no Planejamento de Implantação de Sistemas de Tratamento de Esgotos Sanitários em Bacias Hidrográficas. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v 18 n.1, p. 277-286, 2013.
5. SAADATPOUR, M.; AFSHAR, A. Waste load allocation modeling with fuzzy goals; simulationoptimization approach. *Water Resources Management*, v.21, n.7, p.1207-1224, 2007.
6. 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). Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória. 2004.
7. VON SPERLING, M. Princípios do tratamento biológico de águas residuárias — Estudos e modelagem da qualidade da água em rios. Belo Horizonte, DESA/UFMG, 2007.