IV-075 - DETERMINAÇÃO DE EFICIENCIAS DE SISTEMAS DE TRATAMENTO DE ESGOTO A PARTIR DA APLICAÇÃO COMBINADA DO ALGORITMO GENÉTICO E MODELO DE QUALIDADE DE ÁGUA

Juliana Pereira Louzada Valory [(1)]
Mestranda em Engenharia Ambiental pelo Programa de Pós-Graduação da Universidade Federal do Espírito Santo.Tecnóloga em Saneamento Ambiental pelo Instituto Federal do Espírito Santo.
José Antônio Tosta dos Reis
Professor do Departamento de Engenharia Ambiental da Universidade Federal do Espírito Santo. Doutor em Hidráulica e Saneamento pela Escola de Engenharia de São Carlos/USP.
Antônio Sérgio Ferreira Mendonça
Professor do Departamento de Engenharia Ambiental da Universidade Federal do Espírito Santo. Doutor em Engenharia de Recursos Hídricos pela Colorado State University. Pós-doutorado pela Cornell University.

Endereço[(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**

RESUMO

O esgoto doméstico gerados em áreas urbanas é uma das principais fontes de poluição dos corpos d'água, particularmente em regiões caracterizadas por uma alta urbanização e densidade populacional. Dentre as ações estruturais para despoluição hídrica, a implantação de estações de tratamento de esgoto nos grandes centros urbanos é a principal medida. Numa bacia hidrográfica, com múltiplos aportes de esgotos e com um complexo sistema hídrico, a tomada de decisão acerca do escalonamento das estações de tratamento ao longo da bacia e a distribuição e dos níveis de tratamento das estações de tratamento de esgotos constitui tarefa complexa. Neste contexto, as técnicas de otimização e a modelagem da qualidade de água apresentam-se como importantes ferramentas de apoio ao processo decisório. Este trabalho tem como principal finalidade ilustrar a aplicação conjunta das referidas ferramentas no processo teórico de seleção das eficiências de tratamento de esgotos para a bacia do Rio Santa Maria da Vitória, ES. Na referida bacia foram avaliados três diferentes cenários de disposição final de efluentes domésticos e, a partir da aplicação do Algoritmo Genético, foram determinadas as eficiências de tratamento, de maneira a permitir o atendimento dos padrões estabelecidos para DBO e OD na Resolução CONAMA nº 357/2005. Os resultados demonstraram que o uso combinado de modelo computacional de qualidade de água e técnica de otimização constitui alternativa eficiente para a seleção dos níveis de tratamento, fornecendo indicações necessárias à seleção ou ao escalonamento dos sistemas de tratamento de esgotos numa bacia hidrográfica.

PALAVRAS-CHAVE: Otimização, Algoritmo Genético, modelagem da qualidade da água, tratamento de esgotos.

INTRODUÇÃO

A interferência do homem, quer de forma concentrada, como na geração de despejos domésticos ou industriais, quer de uma forma difusa, como na aplicação de defensivos agrícolas no solo, contribui para a introdução de compostos na água, afetando sua qualidade. A quantificação dos poluentes que chegam no corpo d'água, geralmente, é apresentada em termos de carga , que por sua vez é expressa em termos de massa de poluente por unidade de tempo. Após as alterações induzidas pelas cargas dos despejos, um conjunto de processos físicos, químicos e biológicos se estabelece no curso d'água, buscando restabelecer o equilíbrio do meio aquático. Este conjunto de processos é usualmente denominado autodepuração.

A adequada avaliação da capacidade de autodepuração de um curso d'água impõe a qualidade dos efluentes que poderá receber, condicionando os níveis mínimos de remoção dos diferentes constituintes presentes no esgoto bruto e, por conseqüência, o projeto, a operação e a manutenção das plantas de tratamento de esgotos.

O processo de seleção de sistemas de tratamento de esgotos, além de estar limitado pelas questões de ordem ambiental, envolve análise de relações de custo e benefício relacionados com implantação e operação das

inúmeras possibilidades de plantas de tratamento disponíveis. À medida que cresce a complexidade de uma bacia hidrográfica, que normalmente apresenta cursos d'água com diferentes características hidrodinâmicas, inúmeros pontos de captação de água e de disposição de efluentes domésticos e industriais, o referido processo de seleção torna-se mais complexo.

Diferentes trabalhos, como Albertini *et al (*2006), Pettelier *et* al (2006), Holenda (2007), Saadatpour e Afshar (2007), apresentam o uso combinado de técnicas de otimização e modelagem da qualidade da água, para alocação de cargas orgânicas e aplicação de medidas de controle de poluição em corpos d'água. Dentre as técnicas de otimização, as mais tradicionais, como a Programação Linear, Programação Não Linear e Programação Dinâmica, têm sido empregados como suporte para a resolução de problemas associados à seleção de sistemas de tratamento esgoto e, conseqüente, à minimização dos custos relacionados com implantação, manutenção e operação destes sistemas (Aras 2007; Cho, 2004;).

Em função das limitações existentes nos métodos convencionais e pelo vertiginoso desenvolvimento de computadores e softwares, novas técnicas de otimização chamadas de metaheurísticas, como a Lógica Fuzzy, Redes Neurais Artificiais, Algoritmo Genético, "Simulated Annealing" e "Ant Colony Algorithms" têm sido empregadas para a solução de problemas de otimização, sejam eles lineares ou não (Albertini *et al*, 2006). Dentre as principais vantagens conferidas às metaheurísticas está a determinação de uma solução muito próxima do ótimo global, a um custo computacional e tempo de processamento irrisórios.

O Algoritmo Genético (AG) é uma metaheurística criada por John Holland em meados da década de 70 (Holland, 1975) e que possui métodos de busca direta inspirados nos mecanismos da teoria da evolução das espécies de Charles Darwin. O AG utiliza de informações diretas acerca da função objetivo, não havendo a necessidade da determinação de derivadas. Outra vantagem apresentada pelo AG é que ele trabalha com uma população de soluções aleatórias e operadores estocásticos, o que possibilita uma avaliação mais abrangente do espaço de busca a cada iteração, propiciando a fuga de ótimos locais em direção ao ótimo global.

A implementação de um algoritmo genético começa com a geração de uma população inicial, que é formada por um conjunto aleatório de cromossomos. Em geral, um cromossomo representa um conjunto de parâmetros da função objetivo cuja resposta será maximizada ou minimizada. A cada cromossomo é atribuída uma aptidão (*fitness*), uma nota que mede quão boa é a solução que ele representa (nesse ponto os cromossomos passam a serem chamados de indivíduos). A determinação do valor de aptidão de um indivíduo muitas vezes é baseada no próprio valor da função objetivo associada ao indivíduo, influenciando de forma significativa o processo de seleção dentro de uma população (LACERDA E CARVALHO, 1999).

A evolução do processo de busca depende de operadores e parâmetros genéticos que atuam sobre os indivíduos e produzem uma nova geração com as possíveis soluções ótimas do problema. São operadores mais convencionais a reprodução, o cruzamento (*crossover*) e a mutação. Segundo Park *et al* (2006) e Silva e Reis (2002), a reprodução é o processo através do qual cadeias representativas de soluções são copiadas para a próxima iteração de AG (ou geração), de acordo com o valor da função de aptidão correspondente, através de um processo de seleção que privilegia a sobrevivência das melhores soluções. Na sua forma mais simples cruzamento realiza a troca parcial de segmentos correspondentes de indivíduos "pais" produzindo dois novos indivíduos "filhos". A mutação é a degeneração ocasional dos valores, permitindo a introdução de novas características às populações. Os parâmetros do AG são representados pelo tipo de cruzamento, tipo de mutação, critério de parada e tamanho da população. Existe ainda uma técnica chamada Elitismo que consiste em reintroduzir o indivíduo melhor avaliado de uma geração para a seguinte, evitando a perda de informações importantes presentes em indivíduos de elevada aptidão que, eventualmente, podem ser perdidas durante os processos de seleção, cruzamento e mutação.

Os trabalhos de Cho et al (2004), Yandamuri et al (2006), Burni e Yulliant (2001), Heliang e Faliang (2009), Pettelier et al (2006), Carvalho e Kaviski (2009), Aras et al (2007), Holenda et al (2007), Saadatpour e Afshar (2007), dentre outros, constituem exemplos do uso de metaheurísticas, em especial do AG, como ferramenta de suporte ao planejamento e gerenciamento de recursos hídricos.

Este trabalho tem como objetivo determinar, a partir do uso combinado de modelagem da qualidade da água e uma técnica de otimização – o Algoritmo Genético – as eficiências mínimas de estações de tratamento de esgotos que, no âmbito de uma bacia hidrográfica, permitam a manutenção dos padrões de qualidade ambiental estabelecidos para corpos d'água interiores.

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 (Figura 01). 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, irrigação e geração de energia elétrica (Caiado et al., 1999).

Segundo Roques (2006) esta bacia 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.

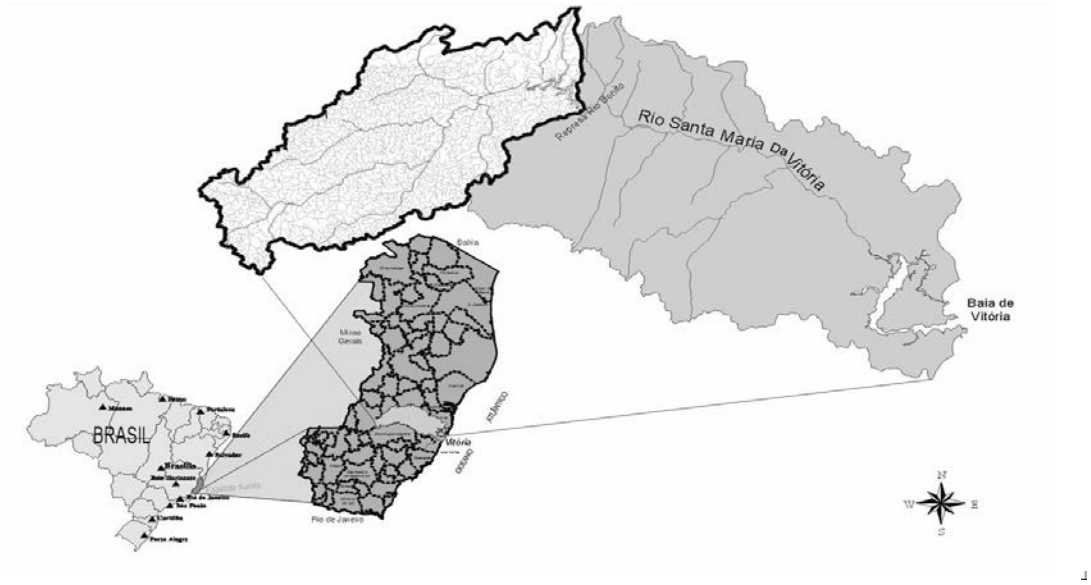

Figura 01 - Localização da bacia hidrográfica do Rio Santa Maria da Vitória.
Fonte: Zamprogno (1999).

Modelagem da Qualidade da Água

Para simulação da qualidade da água foi desenvolvido, no ambiente do software MatLab, modelo matemático de qualidade de água. Este modelo abrangeu as interações físicas de mistura e as reações biológicas que caracterizam o processo natural de autodepuração habitualmente observadas num corpo d'água lótico, reproduzindo as formulações matemáticas e estruturas conceitual e computacional do modelo QUAL-UFMG, modelo detalhadamente apresentado e discutido por Von Sperling (2007).

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), principais constituintes que determinam qualidade da água após despejos de efluentes domésticos.

As constantes cinéticas, informações hidrodinâmicas e de qualidade de água consideradas neste estudo 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. Os referidos autores conformaram suas simulações de qualidade de água a partir de dados das campanhas realizadas em março, julho, setembro e outubro de 1997, associadas ao estudo "*Diagnóstico e Plano Diretor das bacias dos rios Santa Maria da Vitória e Jucu*" (HABTEC, 1997). A Tabela 01 apresenta resumidamente as constantes cinéticas e informações hidrodinâmicas pertinentes à simulação dos parâmetros 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)*	$K_2 = m.Q^{-n}$
Constante de revolvimento de lodo(S_d)	0
Constante de sedimentação (K_s)	0
Temperatura do rio	21° C
Altitude da bacia	900 m

Para a determinação do K_2, em função da vazão de cada elemento computacional, foram adotados os valores de 0,90 e -0,04 para m e n respectivamente, conforme metodologia descrita detalhadamente em Louzada (2011). A temperatura média de 21°C e altitude média (900 m) no rio Santa Maria da Vitória foram 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.

Dentre os objetivos do presente trabalho não se encontra a análise do comportamento do corpo d'água recebendo cargas difusas de poluição ou advindas de entrada incremental de vazões. Desta forma considerou-se nulo o valor da taxa de entrada da $DBO_{última}$ associada à cargas difusas afluentes na massa líquida L_{rd}.

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 dos cenários foi estabelecida a partir da combinação de diferentes pontos de disposição de esgotos domésticos e de diferentes vazões para os referidos despejos, sendo sumarizados da seguinte maneira:

- **Cenário I**: lançamento de cinco efluentes com diferentes cargas de poluição e sem nenhum tipo de tratamento(P_1 = 60 L/s, P_2 = 50 L/s, P_3 = 40 L/s, P_4 = 30 L/s e P_5 = 20 L/s), dispostos no Rio Santa Maria da Vitória nos quilômetros 8, 16, 25, 32 e 40.

- **Cenário II**: situação hipotética na qual as vazões dos rios Alto Posmoser e Santa Maria assumiram mesmo valor, influenciando de forma significativa a capacidade de autodepuração ao longo do curso d'água principal. Considerou-se a disposição de esgotos brutos em quatro pontos à montante do Rio Posmoser (quilômetros 4, 8, 12 e 16), todas com vazão de 20 L/s; adicionalmente considerou-se um ponto de disposição de esgotos no quilômetro 25, com vazão de 50 L/s.

Os cenários considerados neste trabalho reproduziram os estudados por Salim (2004). No primeiro cenário, para se evitar a disposição final do terceiro efluente na mesma secção associada à entrada do rio Alto Posmoser, o lançamento do efluente ocorreu no elemento computacional imediatamente à jusante do ponto de entrada do rio.

Para todos os cenários, considerou-se esgoto bruto com DBO de 350 mg/L e concentração nula de OD.

Problema de Otimização

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

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

Sujeito à:

$$DBO_{Esgoto\ Tratado} \leq DBO_{Esgoto\ Bruto} \qquad (02)$$
$$DBO_{Esgoto\ Tratado} \geq 0 \qquad (03)$$
$$DBO_{Curso\ d'água} \leq 5\ mg/L \qquad (04)$$
$$OD_{Curso\ d'água} \geq 5\ mg/L \qquad (05)$$

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, $OD_{Curso\ d'água}$ a concentração de Oxigênio Dissolvido no curso d'água e $DBO_{Esgoto\ Tratado}$, $DBO_{Esgoto\ Bruto}$ e $DBO_{Curso\ d'água}$ 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 estabelecidas pelas expressões (04) e (05).

Adicionalmente às restrições estabelecidas acima, adotou-se para E_i os limites máximo e mínimo de 90% e 0%, respectivamente.

A Resolução CONAMA nº 430/2011, por sua vez, estabelece que a concentração máxima de DBO no efluente tratado não deve superar 120 mg/L. No entanto, a Resolução indica que a referida concentração poderá ser ultrapassada naquelas situações em que o sistema de tratamento apresentar eficiência mínima de 60% para remoção DBO, ou mediante estudo de autodepuração do corpo hídrico que comprove atendimento às metas do enquadramento do corpo receptor.

Neste contexto, uma restrição adicional associada à remoção de DBO foi considerada, estabelecendo-se três diferentes grupos de otimização para cada um dos cenários de simulação anteriormente descritos. A restrição adicional assumiu as seguintes formas:

- Grupo I - $E_i \geq 0$, ignorando-se o valor mínimo para eficiência de remoção de DBO (60%) e o valor máximo para a DBO no esgoto tratado (120 mg/L) sugeridos pela Resolução CONAMA nº 430/2011. Neste grupo assumiu-se a possibilidade de disposição final de efluentes brutos desde que se obedeçam as condições, padrões e exigências dispostas na Resolução CONAMA nº 357/2005. Nesta opção, toda a carga de DBO lançada poderia ser assimilada em decorrência da capacidade de autodepuração do curso d'água.
- Grupo II - $DBO_{Esgoto\ Tratado} \leq 120$ mg/L, observando-se o valor máximo de DBO no esgoto tratado, conforme estabelecido pela Resolução CONAMA nº 430/2011;
- Grupo III - $E_i \geq 60\%$, observando-se o valor mínimo de eficiência para remoção de DBO estabelecido pela Resolução CONAMA nº 430/2011. Nesta opção admite-se o lançamento de concentrações de DBO no esgoto tratado superiores a 120 mg/L;

Para a solução do problema de otimização proposto neste trabalho foi utilizado o toolbox Algoritmo Genético disponível no software MatLab. O cromossomo, neste trabalho, representarou um vetor de números reais cujas posições representam eficiências a serem estimadas para cada possível sistema de tratamento de esgoto.

A Tabela 03 apresenta os operadores e parâmetros genéticos utilizados no algoritmo para a obtenção da solução ótima.

Tabela 03 - Operados e parâmetros genéticos aplicados no Algoritmo

Parâmetro / Operador	Valor / Tipo
Tamanho da População Inicial	20 indivíduos
Seleção	Torneio (grupos de 4 indivíduos)
Crossover	Aritmético
Mutação	Uniforme
Taxa Crossover	80%
Taxa Mutação	5%
Elitismo	2 indivíduos
Critério de parada	100 Gerações ou convergência dos resultados

Na seleção por torneio, foram escolhidos aleatoriamente 4 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 das taxas de *crossover* mutação especificadas na Tabela 03. A técnica do Elitismo foi aplicada reintroduzindo-se dois dos melhores pais selecionados na população subsequente.

RESULTADOS

As eficiências estimadas com a aplicação combinada do modelo de qualidade de água e dos AG's, adotando-se os operadores e parâmetros descritos na Tabela 03 e considerando-se os diferentes grupos de simulação associados aos diferentes cenários, estão reunidas na tabelas 04 e 05.

Tabela 04 - Eficiências de remoção de DBO (em %) dos sistemas de tratamentos de esgotos associados ao cenário I

Grupo de restrições	P_1	P_2	P_3	P_4	P_5	∑ Eficiências
Grupo I	85	80	65	40	15	285
Grupo II	66	66	66	66	66	330
Grupo III	65	60	60	65	60	310

Tabela 05 - Eficiências de remoção de DBO (em %) dos sistemas de tratamentos de esgotos associados ao cenário II

Grupo de restrições	P_1	P_2	P_3	P_4	P_5	∑ Eficiências
Grupo I	40	35	50	50	20	195
Grupo II	66	66	66	66	66	330
Grupo III	60	60	60	60	60	300

Os perfis de OD e $DBO_{5,20}$, por cenário estabelecido e grupo de simulações realizadas estão apresentados pelas figuras 02 e 03. Estas figuras apresentam adicionalmente, a variação espacial das concentrações de OD e $DBO_{5,20}$ naquelas situações em que se considerou a disposição de efluentes brutos ao longo do rio Santa Maria da Vitória.

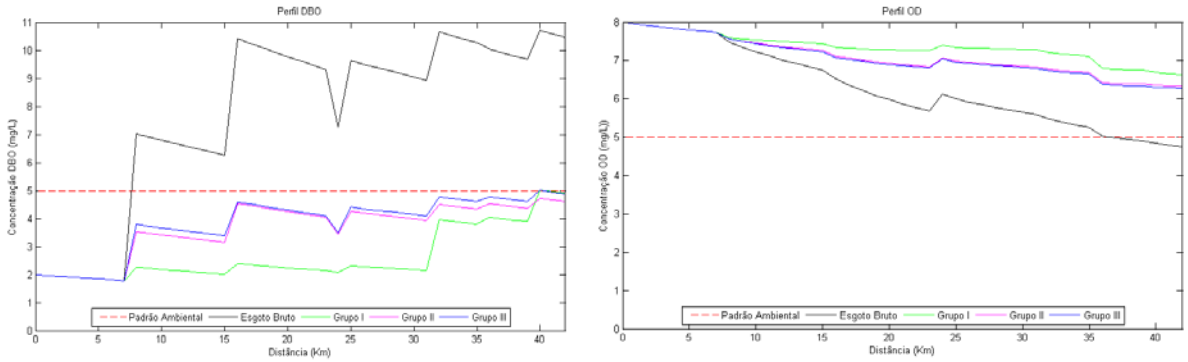

Figura 02 - Perfis de DBO e OD associados ao cenário I

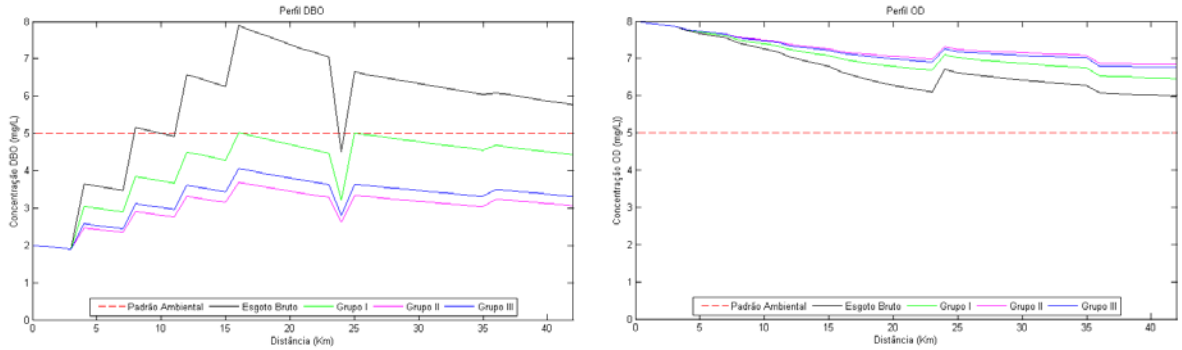

Figura 03 - Perfis de DBO e OD associados ao cenário II

A partir da simples inspeção das figuras 02 e 03 é possível observar que as concentrações de DBO estão em desacordo com os padrões de qualidade ambiental para os dois cenários quando da disposição de efluentes brutos. No cenário I as concentrações de DBO atingiram 10,8 mg/L, enquanto que no cenário II as concentrações alcançaram 7,9mg/L. Observa-se também que, no primeiro cenário, as concentrações críticas de OD ficaram abaixo do padrão estabelecido pela Resolução CONAMA nº 357/2005, chegando a uma concentração mínima de 4,75 mg/L.

As concentrações de OD e DBO, em todos os cenários e grupos de simulações analisados, passaram a respeitar a concentração limite para a manutenção da qualidade do corpo d'água classe II quando da aplicação das eficiências de tratamento estimadas pela técnica de otimização. No entanto, o menor conjunto de eficiências, em todos os cenários, foi estabelecido no grupo de simulações que explorava o limite da capacidade de autodepuração do curso d'água (possibilidade de eventuais lançamentos de esgoto bruto). Adicionalmente, observou-se que concentrações de DBO no esgoto tratado de até 120 mg/L poderiam ser suportadas pelo corpo receptor, o que justifica os iguais percentuais de tratamento estimados a partir do segundo grupo de simulações.

Observa-se, conforme resultados reunidos nas tabelas 04 e 05, que o cenário II apresentou menor somatório das eficiências de tratamento. Esse resultado é decorrente do fato de que, neste cenário, a carga orgânica total distribuída ao longo de todo o trecho estudado do rio Santa Maria da Vitória é menor que aquela associada ao cenário I. Adicionalmente, é relevante observar que no segundo cenário, o rio Alto Posmoser assumiu a vazão de 3,85 m^3/s (mesma vazão do rio principal), aumentando substancialmente a capacidade diluição dos despejos orgânicos no rio Santa Maria da Vitória

CONCLUSÕES

Os principais resultados deste trabalho podem ser assim sumarizados:

- A metodologia empregada permitiu estimativas de eficiências mínimas de tratamento de esgotos que, considerando diferentes possíveis cenários de disposição final, permitiriam a manutenção dos padrões de qualidade associados à demanda bioquímica de oxigênio e ao oxigênio dissolvido ao longo de toda a extensão da porção superior do rio Santa Maria da Vitória;
- O estudo de caso demonstra que a adoção dos níveis mínimos de remoção de DBO estabelecidos pela Resolução CONAMA n° 430/2011, desconsiderando-se as capacidades de autodepuração dos corpos receptores, pode conduzir a aumento nos investimentos para implantação de sistemas de tratamento de efluentes, sem que ocorram ganhos associados à manutenção dos padrões ambientais referentes à OD e DBO

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ALBERTINI, L. L; MAUAD, F.F; DANIEL, L. A. 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, pag: 209-219, Out/Dez, 2006.
2. ARAS, E; TOGAN, V. BERKUN,M. River water quality management model using genetic algorithm. **Enviromental Fluidic Mechanical**. Vol 7.p 439-450,2007.
3. BRASIL. Resolução CONAMA nº 357, de 17 de março de 2005. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Brasília, 17 mar. 2005.
4. BRASIL. Resolução CONAMA nº 430, de 13 de maio de 2011. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Brasília, 13 de maio de 2011.
5. BURN, D. H.; YULIANTI, J. S. Waste-load allocation using genetic algorithms. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 127, n. 2, p. 121-129, 2001.
6. CAIADO, M. A. C., MENDONÇA, A. S. F., LUPPI, S. M., TEIXEIRA, E. C. Desenvolvimento Regional e Qualidade das Águas da Bacia do Rio Santa Maria da Vitória .In: Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, XIII. **Anais XIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**: Belo Horizonte, 1999.
7. CARVALHO, R.C; KAVISKI, E. Modelo de Auxílio à Tomada de Decisões em Processos de Despoluição de Bacias Hidrográficas. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**. Vol. 14, nº 4, p. 17-27. 2009.
8. CHO, J. H., SUNG, K. S.,HA, S. R. "A river water quality management model for optimising regional wastewater treatment using a genetic algorithm." **Journal Environment Management**,73 (3), 229–242, july-2004.
9. HABTEC - Engenharia Sanitária e Ambiental**. Diagnóstico Plano Diretor das Bacias dos Rios Santa Maria da Vitória e Jucu:** Ecossistemas Aquáticos Interiores e Recursos Hídricos. Relatório Diagnóstico. Volume I. Consórcio Intermunicipal e Recuperação das Bacias dos Rios Santa Maria da Vitória e Jucu. Convênio MMA/SRH 181/96. 1997.
10. HELIANG, L. FALIANG, G. Applying Genetic Algorithm in Optimal Allocation of Water Resources Based on Water Rights. **Chinese Control and Decision Conference**. 2009.
11. HOLENDA. B; DOMOKOS, E; RÉDEY, A; FAZAKAS, J. Aeration optimization of a wastewater treatment plant using genetic algorithm. **Optimal Control Applications and Methods**. V.28:191–208. 2007.
12. HOLLAND, J.H. **Adaptation in natural and artificial systems**. University of Michigan Press, 1975.
13. LACERDA, E. G. M. de; CARVALHO, A. C. P. L. F. de. **Introdução aos algoritmos genéticos.** In: Galvão, C. de O.; Valença, M.J.S. (orgs.). Sistemas inteligentes: aplicações a recursos hídricos e ciências ambientais: Porto Alegre: Ed.Universidade/UFRGS, 1999. p. 99-150.
14. LOUZADA, J. P. Aplicação da Programação Não Linear para a Seleção de Eficiências Mínimas de Tratamento de Efluentes Domésticos. Um estudo de caso para a bacia do rio Santa Maria da Vitória. Trabalho de conclusão de curso. Instituto Federal do Espírito Santo. Vitória. 2011.
15. MENDONÇA, A.S.F.; ALMEIDA, M.M. 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; ABRH; p.501-510.2005.
16. PETTELIER, J.G; CHAPRA, C.S; TAO, H. A framework for modeling water quality in streams and rivers using a genetic algorithm for calibration. **Environmental Modelling & Software.** Vol. 21, p.419-425**,** 2006.

17. 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.
18. SAADATPOUR, M. AFSHAR. A. Waste load allocation modeling with fuzzy goals; simulation-optimization approach. **Water Resource Management**. Vol 21. Pags: 1207-1224. 2007.
19. 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.
SILVA, F. G. B. ; REIS, L. F. R. . Calibração de redes de distribuição de água com algoritmos genéticos aplicada a uma rede hipotética. In: VI Simpósio Italo Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiêntal, 2002, Vitória - ES. Anais do Evento, 2002
20. VON SPERLING. **Princípios do tratamento biológico de águas residuárias – Estudos e modelagem da qualidade da água de rios.** Belo Horizonte, DESA/UFMG. 2007.
21. 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.