UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS, NATURAIS E DA SAÚDE
DEPARTAMENTO DE COMPUTAÇÃO

SILVIA BORTOLOTE DESQUIAVONI

GREEDY RANDOMIZED ADAPTIVE SEARCH PROCEDURE PARA SELEÇÃO DE EFICIÊNCIAS E VAZÕES PARA O PROBLEMA DE LANÇAMENTO PONTUAL DE CARGAS EFLUENTES

ALEGRE - ES
2017

SILVIA BORTOLOTE DESQUIAVONI

GREEDY RANDOMIZED ADAPTIVE SEARCH PROCEDURE PARA SELEÇÃO DE EFICIÊNCIAS E VAZÕES PARA O PROBLEMA DE LANÇAMENTO PONTUAL DE CARGAS EFLUENTES

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Departamento de Computação do Centro de Ciências Exatas, Naturais e da Saúde da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Ciência da Computação.

Orientadora: Profª. Drª. Larice Nogueira de Andrade.

ALEGRE - ES

2017

SILVIA BORTOLOTE DESQUIAVONI

GREEDY RANDOMIZED ADAPTIVE SEARCH PROCEDURE PARA SELEÇÃO DE EFICIÊNCIAS E VAZÕES PARA O PROBLEMA DE LANÇAMENTO PONTUAL DE CARGAS EFLUENTES

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Departamento de Computação do Centro de Ciências Exatas, Naturais e da Saúde da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharela em Ciência da Computação.

Aprovado em ____ de dezembro de 2017.

BANCADA EXAMINADORA

Profª. Drª. Larice de Nogueira Andrade
Universidade Federal do Espírito Santo

Prof. M.Sc. Edmar Hell Kampke
Universidade Federal do Espírito Santo

Prof. M.Sc. Jacson Rodrigues Correia da Silva
Universidade Federal do Espírito Santo

“A menos que modifiquemos a nossa maneira de pensar, não seremos capazes de resolver os problemas causados pela forma como nos acostumamos a ver o mundo”.

Albert Einstein

AGRADECIMENTOS

A Deus, por tudo que fez e tens feito na minha vida.

Aos meus pais, Severino e Aparecida, que não mediram esforços para me ajudar, que desde de criança me incentivaram a correr atrás dos meus sonhos.

A minha irmã, Catuliana, e meus irmãos, Abel e Amadeus, que sempre me apoiaram.

A esta universidade que permitiu que pudesse ter acesso a um ensino de qualidade.

Ao corpo docente do DCOMP, pelo conhecimento passado.

A minha orientadora pela paciência e pela disponibilidade para me receber e sanar minhas dúvidas.

A todos, muito obrigado.

RESUMO

A análise da capacidade de autodepuração de um curso d'água é de grande importância para a gestão dos recursos hídricos, permitindo determinar a qualidade de um efluente a ser lançado e com isso determinar os níveis de tratamento e vazões necessárias. A medida que cresce a complexidade de um sistema hídrico, essa tomada de decisão torna difícil, considerando as relações de custo e benefício entre inúmeras possibilidades. Este trabalho tem como objetivo apresentar uma nova alternativa para o problema de lançamento pontual de efluentes em cursos de água, visando auxiliar os usuários na gestão dos recursos hídricos, utilizando para isso o modelo proposto por Andrade et al. (2013). Na solução proposta, a bacia hidrográfica é dividida em elementos computacionais, em que são dispostos os efluentes, e é feita a simulação da qualidade da água, utilizando o modelo de *Streeter-Phelps*. O objetivo é definir para cada efluente lançado na bacia a eficiência de tratamento e vazão, de acordo com o objetivo, que pode ser reduzir os custos com as eficiências de tratamento, reduzir a vazão dos efluentes, reduzir a equidade entre os efluentes e maximizar a qualidade da água. Para solucionar o problema, é utilizado a meta-heurística *Greedy Randomized Adaptive Search Procedure* (GRASP). Para avaliação da metodologia proposta, foram considerados dois cenários hipotéticos de disposição de efluentes em uma bacia hidrográfica e um método exaustivo afim de fazer uma comparação entre os resultados obtidos pela meta-heurística.

Palavras-chave: Eficiências de Cargas Efluentes; Vazões de Cargas Efluentes*;* *Greedy Randomized Adaptive Search Procedure*; Meta-heurística*, Streeter-Phelps.*

GREEDY RANDOMIZED ADAPTIVE SEARCH PROCEDURE FOR SELECTION OF EFFICIENCIES AND FLOWS FOR PROBLEM OF PUNCTUAL LAUNCH OF EFFLUENT LOADS

ABSTRACT

The analysis of the capacity of autodepuration of a watercourse is of great importance for the management of the water resources, allowing to determine the quality of an effluent to be released and with this to determine the levels of treatment and flows necessary. As the complexity of a water system grows, such decision making makes it difficult, considering the cost and benefit relationships among many possibilities. The objective of this work is to present a new alternative to the problem of point-based effluents in watercourses, in order to assist users in the management of water resources, using the model proposed by Andrade et al. (2013). In the proposed solution, the river basin is divided into computational elements, where the effluents are disposed, and water quality simulation is done using the Streeter-Phelps model. The objective is to define for each effluent released in the basin the efficiency of treatment and flow according to the objective, which may be to reduce costs with treatment efficiencies, reduce effluent flow, reduce effluent equity, and seek to maximize the quality of the water. To solve the problem, the metaheuristic Greedy Randomized Adaptive Search Procedure (GRASP) is used. To evaluate the proposed methodology, two hypothetical scenarios of effluent disposal in a river basin and an exhaustive method will be considered in order to compare the results obtained by the metaheuristic.

Keywords: Effluent Load Efficiencies; Effluent Load Flows; Greedy Randomized Adaptive Search Procedure; metaheuristic, Streeter-Phelps.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Progressão temporal da oxidação da matéria orgânica 19

Figura 2 - Representação de um cenário de uma bacia hidrográfica 25

Figura 3 - Representação de uma solução 26

Figura 4 - Algoritmo GRASP implementado. 29

Figura 5 - Representação esquemática do Cenário 1 30

Figura 6 - Representação esquemática do Cenário 2 30

Figura 7 - Comparação entre as somas das eficiências obtidas entre a meta-heurística GRASP e o Método Exaustivo para o Cenário 1 38

Figura 8 - Comparação entre a soma das vazões obtidas entre a meta-heurística GRASP e o Método Exaustivo para o Cenário 1 38

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classe dos padrões de qualidade de água 16

Tabela 2 – Propriedades dos trechos do Cenário 1. 31

Tabela 3 - Propriedades dos trechos do Cenário 2. 31

Tabela 4 - Resultados obtidos por meio das 50 execuções do método proposto. 33

Tabela 5 - Pesos adotados e soluções do Cenário 1. 33

Tabela 6 - Pesos adotados e soluções do Cenário 2. 34

Tabela 7 - Concentração de OD (mg/L) e DBO (mg/L) para o Cenário 1. 35

Tabela 8 - Concentração de OD (mg/L) e DBO (mg/L) para o Cenário 2. 36

Tabela 9 - Valores das eficiências (em %) obtidas pela meta-heurística GRASP e pelo método EXAUSTIVO para o Cenário 1.....37

Tabela 10 - Valores das vazões (em m³/s) obtidas pela meta-heurística GRASP e pelo método EXAUSTIVO para o Cenário 1.....37

Tabela 11 - Média dos tempos de execução referentes a meta-heurística GRASP e o Método Exaustivo.....38

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO 11

1.1. OBJETIVOS 12

1.1.1. Objetivo geral 12

1.1.2. Objetivos específicos 12

1. FUNDAMENTOS TEÓRICOS 14

1.1. ASPECTOS DE QUALIDADE DAS ÁGUAS e GESTÃO DOS RECURSOS HÍDRICOS 14

1.2. ENQUADRAMENTO DOS RECURSOS HÍDRICOS 16

1.3 OUTORGA DE USOS DA ÁGUA 16

1.3. MODELOS DE SIMULAÇÃO DA QUALIDADE HÍDRICA 17

1.4. STREETER-PHELPS 18

1.5. MODELOS DE OTIMIZAÇÃO 20

1.6. MÉTODO DE OTIMIZAÇÃO GRASP 21

1.7 TRABALHOS CORRELATOS 22

2. METODOLOGIA 25

3.1 MODELO DE OTIMIZAÇÃO 27

3.3 META-HEURÍSTICA GRASP 29

3.4 EXPERIMENTOS COMPUTACIONAIS 30

3. RESULTADOS OBTIDOS E ANÁLISE DOS RESULTADOS 33

4. CONCLUSÕES 40

5. REFERÊNCIAS 41

1. INTRODUÇÃO

Modelos matemáticos que simulam a qualidade hídrica têm sido bastante aplicados na gestão dos recursos hídricos. A utilização desses modelos vem se tornando eficazes e representativos, pois são capazes de simular processos de autodepuração dos cursos d'água (ANDRADE, 2012). Mais do que simular, há uma necessidade de se obter resultados que auxiliam na gestão dos recursos hídricos de forma eficiente, e isto é possível através da aplicação de métodos heurísticos e de modelos que simulam a qualidade da água.

Os métodos heurísticos buscam encontrar soluções para problemas de otimização, cujo foco principal é maximizar ou minimizar uma função objetivo. Esses métodos não garantem que a solução encontrada seja a melhor solução, mas garante boas soluções. A utilização destes métodos é de grande importância para a gestão dos recursos hídricos já que envolve múltiplos objetivos, englobando aspectos sociais, econômicos e ambientais, essenciais para um planejamento sustentável dos recursos hídricos (CUNHA, 2004). Devido a vasta quantidade de soluções possíveis, encontrar soluções de qualidade se torna uma atividade inviável e exaustiva. Por isso, os métodos heurísticos são importantes.

A água é um recurso natural essencial, sendo elemento representativo da civilização humana, elemento bioquímico de seres vivos e importante para o desenvolvimento de atividades econômicas. Dessa forma, é preciso avaliar os impactos do lançamento de efluentes brutos ou tratados em rios, já que estes são a principal fonte de água tratada.

No Brasil, usualmente a implantação de uma estação de tratamento se dá através da expansão física de unidades, este escalonamento permite a redução dos custos de implantação (SPERLING,1998), o que pode não ser a forma mais adequada de dispor a estação de tratamento.

Existem várias alternativas no que concerne o controle da poluição por esgotos, tais como a regularização da vazão dos cursos d'agua e o tratamento individual, antes do lançamento, para modificar a qualidade dos efluentes lançados. Todavia, a escolha do processo de tratamento de esgoto não deve ser feita de modo pontual e isolada.

As tomadas de decisão em um corpo d'água precisam levar em consideração os efeitos que tais medidas ocasionarão em toda bacia hidrográfica a qual o corpo d'agua pertence.

A complexidade inerente nas escolhas dos processos de tratamento de esgotos de uma bacia hidrográfica tem estimulado a utilização de técnicas de otimização e de modelos matemáticos de qualidade de água. Sendo uma eficiente forma de avaliar os impactos do lançamento de cargas poluidoras.

Modelos de qualidade da água como o Streeter-Phelps levam em consideração propriedades da água, como exemplo, a de autodepuração. Sendo assim, é possível selecionar eficiências de tratamento e vazões estratégicas para cada efluente lançado na bacia hidrográfica, e com isso reduzir os custos e melhorar a qualidade da água.

Assim, neste trabalho, busca-se implementar uma alternativa eficiente e eficaz para auxiliar nos processos decisórios de gestão e planejamento dos recursos hídricos. Combinando o modelo Streeter-Phelps e a meta-heurística de otimização GRASP para seleção de eficiências de tratamentos e vazões de efluentes para dois cenários hipotéticos.

1.1. OBJETIVOS

1.1.1. Objetivo geral

O objetivo geral deste trabalho foi aplicar a meta-heurística *Greedy Randomized Adaptive Search Procedure* (GRASP) em conjunto com o modelo de qualidade da água Streeter-Phelps para auxiliar na definição de eficiências e vazões para cargas efluentes, de modo a obter uma nova alternativa para a seleção de eficiências e vazões para o problema de lançamento pontual de cargas efluentes.

1.1.2. Objetivos específicos

a) Modelar computacionalmente a equação de Streter-Phelps.
b) Implementar e aplicar a meta-heurística *GRASP* para resolver o modelo proposto por Andrade et al. (2013).
c) Aplicar o método proposto aos cenários hipotéticos criados.

d) Fazer testes e comparar os resultados obtidos pela meta-heurística e pelo método exaustivo.

1. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Com o intuito de fortalecer um embasamento teórico a respeito dos métodos utilizados ao longo desse trabalho, nesse tópico são discutidos brevemente temas considerados relevantes à compreensão dos assuntos abordados nos próximos capítulos.

1.1. ASPECTOS DE QUALIDADE DAS ÁGUAS e GESTÃO DOS RECURSOS HÍDRICOS

Existem alguns parâmetros físicos, químicos e biológico que definem são usados para definir a qualidade da água são pH, alcalinidade, cor, turbidez, dureza, fósforo orgânico e inorgânico, fósforo total, nitratos, nitritos, amônia, nitrogênio total, coliformes fecais e Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO), Demanda Química de Oxigênio (DQO), Oxigênio Dissolvido (OD) (Andrade et al. (2013)).

Os parâmetros mais utilizados para caracterização dos corpos hídricos, de águas brutas e tratadas, e utilizados nesse trabalho são o Oxigênio Dissolvido (OD) e a Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO).

O OD é o parâmetro mais utilizado para caracterizar o corpo hídrico, além de ser essencial para os seres aquáticos aeróbicos, é usado durante a estabilização da matéria orgânica pelas bactérias nos seus processos respiratórios.

A DBO representa o teor de matéria orgânica no corpo d’água ou nos esgotos, indicando o potencial do consumo do OD, ou seja, a quantidade de OD necessário para estabilizar a matéria orgânica.

A matéria orgânica lançada em um corpo d’água sofre um processo natural de autodepuração. De acordo com Sperling (1996), a autodepuração pode ser entendida como um fenômeno ecológico do restabelecimento do equilíbrio no meio aquático, a busca pelas propriedades inicias encontradas antes do lançamento de efluentes.

Uma das principais formulações matemáticas utilizadas para modelar o processo de autodepuração foi proposta por Harold Warner Streeter e Earle Bernad Phelps em 1925, que propiciou grande impulso para o entendimento do fenômeno de autodepuração em águas receptores de efluentes.

A compreensão do processo de autodepuração dos cursos d'água é de suma importância para a adoção de medidas e ações. Dessa forma, pode-se buscar medidas e ações estabelecendo metas e controlando as descargas de efluentes, de forma que um nível de qualidade da água seja mantido.

Em 8 de janeiro de 1997, foi criada a Lei nº 9.433, mais conhecida como Lei das águas, que instituiu a Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH) e criou o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos (Singreh), estabelecendo importantes instrumentos para a gestão dos recursos hídricos no Brasil, como os mencionados a seguir:

- Planos de recursos hídricos – são planos diretores que visam fundamentar e orientar a implementação da Política Nacional de Recursos Hídricos e o gerenciamento dos recursos hídricos.
- Enquadramento dos corpos de água em classes, segundo os usos preponderantes da água – visa assegurar às águas qualidade compatível com os usos mais exigentes a que forem destinadas.
- Outorga dos direitos de uso de recursos hídricos – tem como objetivos assegurar o controle quantitativo e qualitativo dos usos da água e o efetivo exercício dos direitos de acesso à água.
- Cobrança pelo uso de recursos hídricos – Reconhece a água como bem econômico e dar ao usuário uma indicação de seu real valor, incentivando a racionalização do uso da água.
- Sistema de Informações sobre Recursos Hídricos - São objetivos do Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos: reunir, dar consistência e divulgar os dados e informações sobre a situação qualitativa e quantitativa dos recursos hídricos no Brasil.

Dentre os instrumentos estabelecidos pela PNRH, alguns aspectos gerais sobre aqueles que se relacionam com este trabalho são: a outorga dos direitos de uso e o enquadramento dos recursos hídricos.

1.2. ENQUADRAMENTO DOS RECURSOS HÍDRICOS

O enquadramento dos corpos d'água em classes é um importante instrumento de planejamento, que visa estabelecer padrões de qualidade compatíveis com os usos prioritários e diminuir os custos de combate à poluição das águas, mediante ações preventivas.

A resolução CONAMA 357/05 define os padrões e objetivos de qualidade, para as águas doces, por meio de classes, cujas qualidades variam de acordo com os usos a que se destinam.

As concentrações máximas e mínimas permitidas para os parâmetros DBO e OD, para cada classe são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 - Classe dos padrões de qualidade de água

Classe	**DBO (mg/L)**	**OD (mg/L)**
1	<=3	>=6
2	<=5	>=5
3	<=10	>=4
4	*	>=2

(*) A Classe 4 não estabelece valor para o parâmetro de DBO

1.3 OUTORGA DE USOS DA ÁGUA

A principal função da outorga de uso de recursos hídricos é assegurar o controle quantitativo e qualitativo dos corpos hídricos, assegurando o direito de acesso à água, de acordo com o art.11 da Lei 9.433/97.

Segundo o artigo 12 da Lei 9.433/97, estão sujeitos à outorga:

> I - derivação ou captação de parcela da água existente em um corpo de água para consumo final, inclusive abastecimento público, ou insumo de processo produtivo;
>
> II - extração de água de aquífero subterrâneo para consumo final ou insumo de processo produtivo;

> III - lançamento em corpo d’água de esgotos e demais resíduos líquidos ou gasosos, tratados ou não, com o fim de sua diluição, transporte ou disposição final;
>
> IV - aproveitamento dos potenciais hidrelétricos;
>
> V - outros usos que alterem o regime, a quantidade ou a
>
> qualidade da água existente em um corpo de água.

A outorga de direito de uso da água para o lançamento de efluentes é um dos principais instrumentos de gerenciamento e alocação de cargas efluentes que permite a redução e o controle da poluição dos recursos hídricos.

1.3. MODELOS DE SIMULAÇÃO DA QUALIDADE HÍDRICA

Os modelos de simulação da qualidade são constituídos de expressões matemáticas que definem os processos físicos, químicos e biológicos presentes no corpo d’água. Com isso, a utilização desses modelos tem uma grande vantagem de fornecer resultados quantitativos.

Esses modelos podem auxiliar os gestores na definição de planos de gestão dos recursos hídricos, de forma evitar a degradação da qualidade hídrica e para a outorga. A utilização adequada dos modelos decorre da escolha mais apropriada para cada situação, de modo a auxiliar na pesquisa e no processo de gestão dos recursos hídricos (OPPA, 2007).

Desde o surgimento do modelo de Streeter-Phelps vários modelos vêm sendo desenvolvidos e utilizados, como, por exemplo, o QUAL2E e o QUAL-UFMG.

O modelo QUAL2E, desenvolvido e lançado pela USEPA (United States Environmental Protection Agency) em 1985 é atualmente o modelo mais utilizado no mundo devido sua elevada popularidade e aplicabilidade (SONG; KIM, 2009). O modelo pode simular até 15 propriedades constituintes de qualidade da d’água.

A aplicabilidade do QUAL2E é restrita para valores constantes de velocidade de fluxo do curso hídrico e vazão de lançamento da carga poluente (PALMIERI; CARVALHO, 2006).

O modelo QUAL-UFMG, desenvolvido baseando-se nas características do modelo QUAL2-E para o ambiente computacional da planilha Excel, possibilita a modelagem da qualidade da água de rios. Esse modelo possibilita a simulação rápida do oxigênio dissolvido, demanda bioquímica de oxigênio, nitrogênio total e suas frações, e coliformes (PASSOS, 2012).

1.4. STREETER-PHELPS

O modelo Streeter-Phels foi proposto em 1925 por Harold Warner Streeter e Earle Bernad Phelps a partir de um estudo do processo de oxidação e aeração no rio Ohio, nos Estados Unidos. A estrutura desse modelo serviu como base para a maioria dos modelos disponíveis atualmente.

O principal efeito do lançamento de esgotos em um curso d’água é o decréscimo dos teores de oxigênio dissolvido. O modelo de Streeter-Phelps faz uso de dois principais parâmetros: o OD e a DBO.

O conceito da DBO pode ser representado de duas formas diferentes:

DBO remanescente: concentração de matéria remanescente na massa liquida em um dado instante.

DBO exercida: oxigênio consumido para estabilizar a matéria orgânica até este instante (SPERLING, 2007).

A progressão ao longo do tempo, seguindo estes conceitos, pode ser vista na Figura 2.

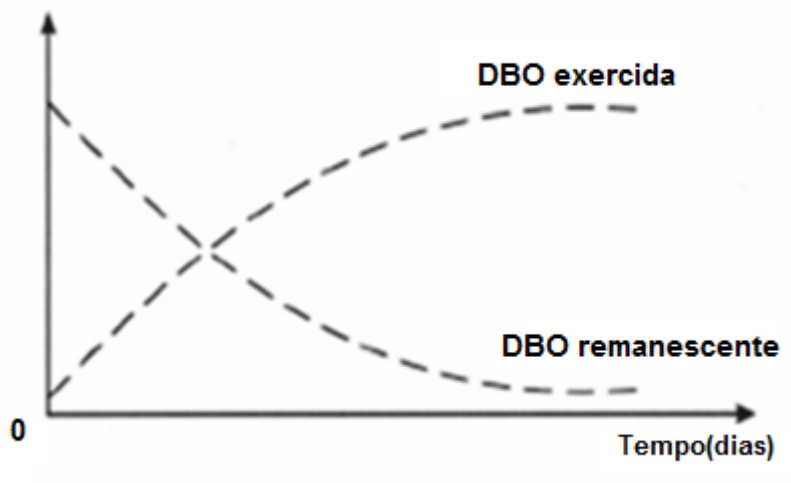

Figura 1 - Progressão temporal da oxidação da matéria orgânica

Pode-se notar que as curvas são simétricas e que no tempo igual a zero, a matéria orgânica se apresenta na sua concentração total, enquanto o oxigênio consumido é zero. Com o passar do tempo a matéria orgânica vai diminuindo implicando no aumento do consumo acumulado de oxigênio. Após um certo tempo, a matéria orgânica restante (*DBO remanescente*) está praticamente estabilizada e o consumo de oxigênio está praticamente todo usado (*DBO exercida*).

O modelo de Streeter-Phelps possibilita a modelagem da demanda bioquímica de oxigênio e do oxigênio dissolvido. As equações (01) e (02) descrevem a variação de DBO e OD assumidas pelo modelo:

$$DBO5_t = DBO5_0 . e - k_d . t \quad (01)$$

$$C_t = C_s - [\frac{k_d . l_0}{k_2 + k_d} . (e - k_d . t - e - k_2 . t) + (C_s - C_0) . e - k_2 . t] \quad (02)$$

Sendo:

$$DBO5_0 = \frac{(Q_r . DBO_r + Q_e . DBO_e)}{Q_r + Q_e}$$

$$C_0 = \frac{(Q_r . OD_r + Q_e . OD_e)}{Q_r + Q_e}$$

C_0 = concentração inicial de oxigênio, logo após a mistura (mg/L)

C_s = Concentração de saturação do gás na massa líquida do rio (mg/L)

C_t = concentração inicial de oxigênio no final do segmento(mg/L)

$DBO5_0$ = concentração de DBO_5, logo após a mistura (mg/L)

DBO_e = concentração de DBO_5 do esgoto (mg/L)

DBO_r= concentração de DBO_5 do rio (mg/L)

$DBO5_t$ = concentração de DBO_5, no final do segmento(mg/L)

k_2 = Coeficiente de reaeração (d^{-1})

k_d= coeficiente de remoção de DBO efetiva do rio (d^{-1})

l_0 = demanda última de oxigênio, logo após a mistura (mg/L)

OD_e = concentração de oxigênio dissolvido no esgoto (mg/L)

OD_r = concentração de DBO_5 do rio, a montante do lançamento dos despejos (mg/L)

Q_e= vazão de esgotos (m^3/s)

Q_r = vazão do rio a montante do lançamento dos despejos (m^3/s)

t = tempo (s)

Para simulação computacional da qualidade da água neste trabalho é empregado modelo de Streeter-Phelps devido a simplicidade conceitual e menor necessidade de dados de entrada.

1.5. MODELOS DE OTIMIZAÇÃO

Os modelos de otimização atuam na resolução de problemas e facilita a obtenção de informações necessárias a tomadas de decisões, buscando solução que forneça o máximo benefício segundo algum critério, buscando uma solução ótima.

Os resultados obtidos pelos modelos de otimização associam cada ponto no espaço de soluções a um número real. Este número permite medir a qualidade de uma resposta: no problema de minimização, quanto menor este valor, melhor a resposta. No problema de maximização, quanto maior este valor, melhor a resposta.

É raro problemas de planejamento hídricos sejam expressos em termos de apenas um objetivo. Os recursos hídricos têm aspectos sociais, econômicos e ambientais, por isso requerem que os planejamentos hídricos englobem os objetivos concorrentes (ALBERTIN, 2008).

1.6. MÉTODO DE OTIMIZAÇÃO GRASP

A otimização é um processo pela busca por uma melhor solução dentre as soluções factíveis encontradas. Essas soluções são classificadas como boas ou ruins em termos de um objetivo. À medida que cresce a complexidade do problema a busca por boas soluções é dificultada, torna-se evidente a importância de técnicas de otimização.

Os avanços da tecnologia da computação, juntamente com o aumento na complexidade nos problemas de gerenciamento dos recursos hídricos têm estimulado o uso de modelos matemáticos e métodos de otimização como ferramentas no auxilio as tomadas de decisão (ALBERTIN, 2008).

Os principais métodos de otimização são os métodos exatos e os métodos heurísticos. Os métodos exatos obtêm a melhor solução para o problema, a partir de um algoritmo específico para resolução do problema. Contudo, devido à complexidade combinatorial de alguns problemas, o tempo computacional para resolução do problema torna-se muito alto. No entanto, os métodos heurísticos são capazes de encontrar soluções viáveis em um tempo computacional aceitável, mas não garantem a otimalidade da solução encontrada (ARAÚLO, 2010).

A meta-heurística GRASP é um processo iterativo de vários inícios. Consiste principalmente em duas fases: heurística de construção e busca local. Na fase de construção cria-se uma solução viável combinando gulosidade e aleatoriedade. Em seguida, é aplicada uma busca local que pesquisa a vizinhança corrente para refinar a solução inicial. Ao fim dessa fase, é obtida uma solução ótima local, pois esta se destacar em relação à solução inicial e suas soluções vizinhas. E a melhor solução encontrada de todas as iterações GRASP é retornada como resultado.

A heurística de construção tem como objetivo prover uma solução factível e de boa qualidade para a fase de busca local, construída iterativamente, elemento por elemento.

O objetivo da fase de busca local é possibilitar melhoria para a solução construída na heurística de construção, através da busca em uma vizinhança por uma solução que

tenha melhor resultado. A vizinhança é o conjunto de soluções próximas à solução inicial que pode ser obtida por um movimento.

Nesse trabalho será empregado a técnica de otimização denominada GRASP (*Greedy Randomized Adaptive Search ProcedureGreedy Randomized Adaptive Search Procedure*), pois tem sido utilizada na resolução de diversos problemas de caráter combinatório, apresentando boas soluções com baixo esforço computacional, incluindo-se aqui a solução de problemas na área de recursos hídricos, como os apresentados no próximo capítulo de Passos (2012) e Araújo (2010).

O método Exaustivo, por sua vez, consiste num método de enumeração completa por meio do qual a solução ótima global é encontrada. No caso do presente trabalho, devido a sua simplicidade, foi possível a construção de um algoritmo que, através de iterações encadeadas, possibilitou a busca da solução ótima entre todo o universo de soluções possíveis.

1.7 TRABALHOS CORRELATOS

Muitas pesquisas vêm sendo feitas para auxiliar na gestão de recursos hídricos. O objetivo quase sempre é o mesmo: minimizar custos e maximizar a melhoria da qualidade da água. Para isso utiliza-se algumas ferramentas como modelos de qualidade da água, modelos matemáticos, meta-heurísticas ou a integração dessas ferramentas. A seguir, é apresentada uma breve revisão bibliográfica e as abordagens utilizadas em alguns dos principais trabalhos relacionados a esse problema.

Passos (2012) utilizou a meta-heurística *GRASP* em combinação com o modelo matemático de qualidade de água *QUAL-UFMG*, com o objetivo de obter eficiências mínimas nos tratamentos de efluentes domésticos associados à bacia do rio Santa Maria da Vitória. A meta-heurística demostrou ser uma técnica eficiente no auxílio da tomada de decisão, dentre as inúmeras possibilidades.

No trabalho realizado por Araújo (2010) utilizaram-se meta-heurísticas na resolução do problema de programação de horários para a irrigação com vistas a obter redução dos valores gastos com água e energia, atendendo as restrições inerentes ao

problema. A utilização do GRASP permitiu a obtenção dos melhores resultados quando comparadas as soluções obtidas entre as técnicas utilizadas.

Rodrigues (2005) desenvolveu um Sistema de Suporte à decisão (SSD) para gestão quali-quantitativa de processos de outorga e cobrança pelo uso da água, levando em consideração a qualidade da água, ou seja, quem capta água com qualidade superior paga mais do que quem capta água com qualidade inferior, assim como, quem mais polui também paga mais, buscando alocação racional dos recursos hídricos. O modelo de simulação de qualidade da água utilizado foi o *Stream Water Quality Model* (QUAL2E), que permite simular 15 variáveis indicativas de qualidade das águas.

Machado (2009) utilizou a meta-heurística *Simulated Annealing* (*SA)* para a otimização do planejamento de sistemas regionais de tratamento de efluentes e sua expansão da capacidade. O uso da meta-heurística provou ser um caminho interessante para a otimização de sistemas hidráulicos, atingindo bons resultados. O modelo busca a configuração regional de menor custo dadas as fontes de efluentes e locais potencias para instalação de estações de tratamento, visando minimizar os custos com uma solução hidráulica que minimize os custos com bombeamento.

Louzada et al. (2013) fizeram uso de otimização e modelagem de qualidade de água para diminuir os gastos com estações de tratamento de esgotos (ETE's). Foram empregadas técnicas de Programação Não Linear (PNL) e para simulação computacional da qualidade da água foi empregado o modelo *QUAL-UFMG*, baseado no modelo QUAL-2E.

Andrade et al. (2013), propuseram um modelo matemático de otimização multiobjetivo, capaz de atender diferentes metas envolvidas no processo de alocação de cargas de efluentes.

Como diferencial aos trabalhos apresentados, o presente trabalho propõe o uso da meta-heurística *GRASP*, para solucionar o modelo proposto por Andrade et al. (2013), que considera diferentes objetivos em um único modelo. Além disso, emprega o modelo de qualidade da água *Streter-Phelps*, que embora seja extremamente simples, apresenta uma boa estimativa das curvas de Oxigênio Dissolvido (OD) e Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) ao longo do tempo, permitindo identificar o local onde

o teor de oxigênio assumirá concentrações mínimas e onde o teor de matéria orgânica assumirá concentrações máximas. Assim, busca-se auxiliar o processo decisório de alocação de cargas poluentes.

2. METODOLOGIA

A metodologia proposta neste trabalho consiste na aplicação da meta-heurística *Greedy Randomized Adaptive Search Procedure* (GRASP) que faz a integração do modelo de simulação da qualidade hídrica *Streeter-Phelps* e o modelo de otimização multiobjetivo adaptado de Andrade et al. (2013), a fim de encontrar a melhor solução possível de acordo com o objetivo desejado.

Para fazer a simulação, a bacia hidrográfica é dividida em elementos computacionais, trechos, como mostrado na Figura 1. Neste cenário demonstrativo, a bacia hidrográfica é composta por 4 trechos. Cada trecho possui um efluente e propriedades próprias.

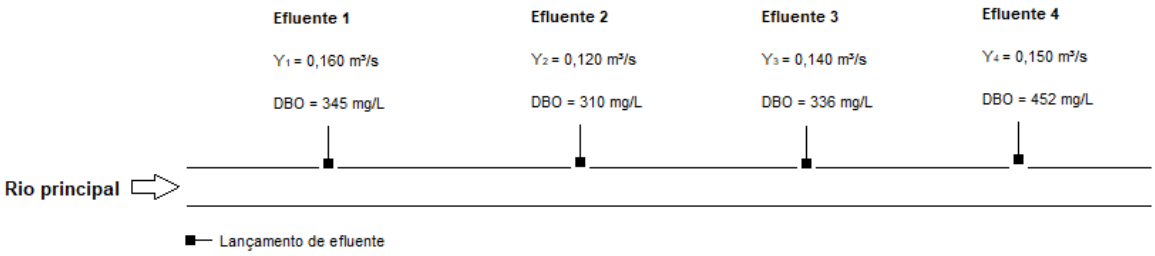

Figura 2 - Representação de um cenário de uma bacia hidrográfica

Busca-se encontrar a vazão e eficiência de tratamento para cada efluente lançado na bacia, de forma a minimizar o modelo multiobjetivo proposto por Andrade et al. (2013).

A solução é representada por uma matriz de duas dimensões com 3 linhas e n colunas, em que n representa a quantidade de efluentes. A primeira linha indica as eficiências para os n efluentes, a segunda linha indica as vazões de lançamento e a terceira linha indica o DBO_{Ri} que é dado pela fórmula:

$$DBO_{Ri} = DBO_{bruto\,i} - (DBO_{bruto\,i} * E_i)$$

Sendo $DBO_{bruto\,i}$ a carga de lançamento de DBO sem tratamento prévio para o efluente *i* e E_i a eficiência para o efluente *i*.

Uma solução hipotética para o cenário apresentado na Figura 2 é mostrado na Figura 3.

X_1 **38**	X_2 **56**	X_3 **42**	X_4 **74**
Y_1 **0,11**	Y_2 **0,12**	Y_3 **0,24**	Y_4 **0,20**
DBO_R **213,90**	DBO_R **136,40**	DBO_R **194,9**	DBO_R **117,5**

Figura 3 - Representação de uma solução

3.1 MODELO DE OTIMIZAÇÃO

A função objetivo visa minimizar o resultado do modelo multiobjetivo proposto por Andrade et al. (2013), descrito da seguinte forma:

Minimizar:

$$w_1 . \sum_{i=1}^{n} x_i \quad - w_2 . \sum_{i=1}^{n} y_i \tag{01}$$

$$+ w_3 . \sum_{i=1}^{n} \left| \frac{x_i}{x} + \frac{v_i}{v} \right| \tag{02}$$

$$+ w_4 . \sum_{j=1}^{m} max(0, OD_{min} - OD_j) \tag{03}$$

$$+ w_5 . \sum_{j=1}^{m} max(0, DBO_j - DBO_{max}) \tag{04}$$

Sujeito a:

$$OD_j = f_1(x, y, \lambda) \qquad \forall j = 1,...,m \tag{05}$$

$$DBO_j = f_2(x, y, \lambda) \qquad \forall j = 1,...,m \tag{06}$$

$$x_i \in \theta \qquad \forall i = 1,...,n \tag{07}$$

$$y_i \in \tau \qquad \forall i = 1,...,n \tag{08}$$

Sendo:

n = número de fontes de efluentes

m = número de elementos (trechos) do rio

x_i = eficiência de tratamento do efluente na fonte i (%)

y_i = vazão de lançamento do efluente na fonte i (m^3/s)

v_i= vazão mássica do efluente na fonte i (mg/s)

x = média das eficiências de tratamento dos efluentes (%)

v = média das vazões mássicas dos efluentes (mg/s)

w_k = valor de penalização do objetivo k

OD_j = concentração de OD no elemento j (mg/L)

DBO_j = concentração de DBO no elemento j (mg/L)

OD_{min} = limite mínimo de oxigênio dissolvido (mg/L)

DBO_{max} = limite máximo de demanda bioquímica de oxigênio (mg/L)

θ = conjunto com a escala de valores para as eficiências de tratamento

τ = conjunto com a escala de valores para as vazões de lançamento

A função considera objetivos distintos. O primeiro termo (01) tem a finalidade de reduzir os custos com o tratamento dos efluentes, por meio da eficiência de tratamento e redução da vazão. O segundo termo (02) proposto por Burn e Yulianti (2001), busca reduzir a inequidade entre todas as descargas efluentes. O quarto (03) e quinto (04) termos tem como objetivo reduzir as violações das concentrações de OD e DBO respectivamente, buscando a maximização da melhoria da qualidade da água. As restrições (05) e (06) se referem aos resultados da simulação por meio do modelo de qualidade da água Streeter-Phelps. Nesses casos, são considerados como parâmetros as eficiências de tratamento e a vazão de todas as n fontes de lançamento. E as restrições (07) e (08) definem os conjuntos de valores possíveis para as variáveis de decisão.

Para cada objetivo, a escolha dos pesos w_k é baseada no grau de importância, por exemplo, para atender as legislações ambientais adotam-se valores altos para w_3 e w_4. No entanto, se a prioridade é diminuir os custos com os tratamentos de efluentes, adota-se peso alto para w_1. Caso se pretenda diminuir a equidade entre os usuários, um valor alto para w_3 deve ser adotado. E por fim, para reduzir as vazões adota-se um alto valor para w_2.

3.3 META-HEURÍSTICA GRASP

A Figura 4 apresenta o pseudocódigo do algoritmo GRASP implementado nesse trabalho.

```
1.  DADO (GMAX e LRC) FAÇA
2.  f* ← infinito
3.  PARA i DE 1 ATE GMAX FAÇA
4.     S ← HEURISTICA_DE_CONSTRUCAO(LRC)
5.     S ← BUSCA_LOCAL(S)
6.     SE (f(S) < f*) ENTÃO
7.        f* ← f(S)
8.        S* ← S
9.     FIM-SE
10. FIM-PARA
11. RETORNAR (S*)
```

Figura 1 - Algoritmo GRASP implementado.

Sendo:

G_{MAX} = número máximo de iterações
LRC = tamanho da lista restrita de candidatos. Define o número de elementos que deverão ser usados para formar uma solução na fase de construção.

S = Representação de uma solução.

f* = valor melhor solução.

f(S) = valor obtido pela solução S.

Nesse trabalho, a solução inicial é gerada a partir dos dados da bacia hidrográfica e é feita a simulação utilizando o modelo Streeter-Phelps.

A heurística de construção utilizada tem como objetivo escolher aleatoriamente LRC efluentes (LRC_EFLUENTES), LRC eficiências (LRC_EFICIENCIAS) e LRC vazões (LRC_VAZOES) e para cada efluente contido no vetor LRC_EFLUENTES é selecionado uma eficiência do vetor LRC_EFICIENCIAS e uma vazão do vetor LRC_VAZOES, de acordo com o DBO, para que efluentes com maiores DBO tenham maiores eficiências e menores vazões.

A busca local construída, escolhe randomicamente a eficiência e a vazão para um efluente escolhido aleatoriamente, que melhore a solução construída na busca local.

3.4 EXPERIMENTOS COMPUTACIONAIS

A fim de verificar o desempenho do método proposto foram realizados experimentos computacionais utilizando dois cenários distintos, com 5 e 10 efluentes. Nas Figuras 4 e 5 são mostradas a representação esquemática dos Cenários 1 e 2.

Para o cenário 1, o rio foi dividido em 5 trechos, onde cada trecho tem 8 km, ou seja, após receber o lançamento de um efluente o rio percorre 8 km até receber o lançamento de outro efluente. Foram considerados para esse cenário 5 efluentes, sem tratamento prévio, com as mesmas concentrações de DBO e vazão, conforme apresentada na Figura 5.

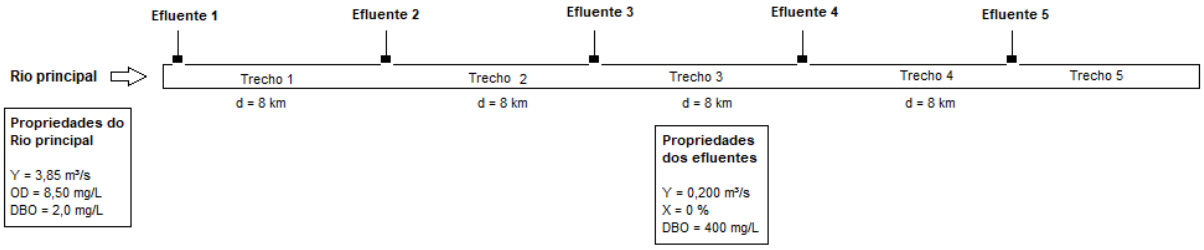

Figura 2 - Representação esquemática do Cenário 1

Para o cenário 2, o rio foi dividido em 10 trechos, onde cada trecho tem 4 km, ou seja, após receber o lançamento de um efluente o rio percorre 4 km até receber o lançamento de outro efluente. Foram considerados para esse cenário 10 efluentes, sem tratamento prévio, com as mesmas concentrações de DBO e vazão, conforme apresentada na Figura 5.

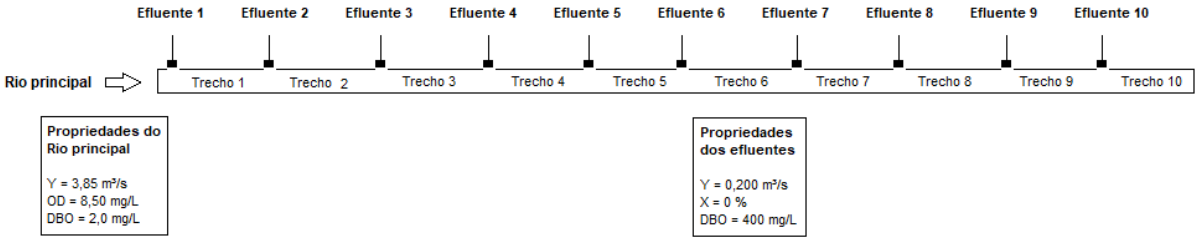

Figura 3 - Representação esquemática do Cenário 2

As tabelas 1 e 2 apresentam as propriedades para cada trecho dos cenários 1 e 2.

Tabela 2 – Propriedades dos trechos do Cenário 1.

Variável/parâmetro	**Rio principal (Trechos)**				
	Trecho 1	Trecho 2	Trecho 3	Trecho 4	Trecho 5
K_1 (d^{-1})	0,44	0,44	0,44	0,44	0,44
K_d (d^{-1})	0,77	0,77	0,77	0,77	0,77
K_2 (d^{-1})	5,23	4,80	4,60	4,50	4,45
C_S (mg/L)	7,90	7,90	7,90	7,90	7,90
Velocidade (m/s)	0,26	0,30	0,33	0,32	0,33
Distância do trecho (km)	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0

Tabela 3 - Propriedades dos trechos do Cenário 2.

Variável/parâmetro	**Rio principal (Trechos)**				
	Trecho 1	Trecho 2	Trecho 3	Trecho 4	Trecho 5
K_1 (d^{-1})	0,44	0,44	0,44	0,44	0,44
K_d (d^{-1})	0,77	0,77	0,77	0,77	0,77
K_2 (d^{-1})	5,23	5,23	4,80	4,80	4,60
C_S (mg/L)	7,90	7,90	7,90	7,90	7,90
Velocidade (m/s)	0,26	0,26	0,30	0,30	0,33
Distância do trecho (km)	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0

Variável/parâmetro	**Rio principal (Trechos)**				
	Trecho 6	Trecho 7	Trecho 8	Trecho 9	Trecho 10
K_1 (d^{-1})	0,44	0,44	0,44	0,44	0,44
K_d (d^{-1})	0,77	0,77	0,77	0,77	0,77
K_2 (d^{-1})	4,60	4,50	4,50	4,45	4,45
C_S (mg/L)	7,90	7,90	7,90	7,90	7,90
Velocidade (m/s)	0,33	0,32	0,32	0,33	0,33
Distância do trecho (km)	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0

Para as simulações foram considerados:

- Foi adotado um valor mínimo de 30% e valor máximo de 80% para as eficiências de tratamentos dos efluentes, assumindo intervalos de 2%, ou seja, θ = {30, 32,...,78, 80}.
- A faixa considerada para a vazão de lançamento foi de 0,100 m^3/s a 0,250 assumindo intervalos de 0,01 m^3/s (t = {0,100, 0,110,..., 0,240, 0,250 }).
- Os padrões considerados foram os estabelecidos pela resolução CONAMA 357/05 para classe 2, ou seja, OD_{min} = 5 mg/L e DBO_{max} = 5 mg/L.
- Os parâmetros utilizados pelo GRASP foram G_{MAX} = 500 segundos. Foram definidos empiricamente para o cenário 1 LRC = 2 e para o canário 2 LRC = 4.

Para cada instância, o método proposto foi submetido a 50 execuções, com o objetivo de avaliar seu desempenho mediante às seguintes informações:

- **Melhor Função Objetivo (MFO):** valor da melhor solução encontrada dentre as 50 execuções do GRASP.
- **FO média (MED):** média aritmética das melhores FOs encontradas nas 50 execuções do GRASP.
- **Desvio (D):** calculado da seguinte forma:

$$D = (((MED-MFO) / MFO)*100)$$

- **Tempo médio (TM):** A média aritmética dos tempos computacionais para encontrar a MFO (em segundos).

3. RESULTADOS OBTIDOS E ANÁLISE DOS RESULTADOS

A seguir, são apresentados os resultados obtidos por meio dos experimentos computacionais. Também é feito a análise com base nos pesos adotados por cada solução.

4.1 RESULTADOS COMPUTACIONAIS

Para cada solução o GRASP foi sujeito a 50 execuções, sendo o tempo limite de cada execução 500 segundos.

A Tabela 3 apresenta para cada instância, o resultado da melhor Função Objetivo (FO) encontrada, a FO média das soluções, o desvio e o tempo médio (em segundos).

Tabela 4 - Resultados obtidos por meio das 50 execuções do método proposto.

Cenário	Solução	Melhor Solução	Solução Média	Desvio (%)	Tempo Médio (seg.)
1	1.1	213,09	215,61	1,18	251,40
	1.2	62,05	63,46	2,27	294,80
	1.3	17,13	29,45	13,92	294,00
	1.4	278,54	343,55	7,34	164,40
2	2.1	446,47	450,91	0,99	321,00
	2.2	144,39	151,86	5,17	200,00
	2.3	107,75	108,95	1,11	263,60
	2.4	906,53	1008,39	11,24	323,80

As Tabelas 3 e 4 mostram as melhores soluções obtidas para o Cenário 1 e 2.

Tabela 5 - Pesos adotados e soluções do Cenário 1.

Solução	Pesos					Resultados									
						Eficiências (%)					Vazões (m³/s)				
	W_1	W_2	W_3	W_4	W_5	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	Y_1	Y_2	Y_3	Y_4	Y_5
1.1	100	1	1	1	1	34	32	34	30	30	0,110	0,100	0,180	0,120	0,120
1.2	1	100	1	1	1	78	76	78	78	60	0,100	0,100	0,100	0,120	0,100
1.3	1	1	100	1	1	80	80	80	80	80	0,200	0,200	0,200	0,200	0,200
1.4	1	1	1	100	100	78	80	80	80	78	0,160	0,100	0,100	0,120	0,130

Solução	Pesos					Resultados				
	W_1	W_2	W_3	W_4	W_5	Soma Efic. (%)	Soma Vazão (m³/s)	Ineguidade	Viol. Total de OD (mg/L)	Viol. Total de DBO (mg/L)
1.1	100	1	1	1	1	**160**	**0,63**	**0,88**	**0,49**	**51,1**
1.2	1	100	1	1	1	**370**	**0,52**	**2,67**	**0**	**3,67**
1.3	1	1	100	1	1	**400**	**1,00**	**0**	**0**	**12,13**
1.4	1	1	1	100	100	**396**	**0,61**	**1,29**	**0**	**2,72**

Tabela 6 - Pesos adotados e soluções do Cenário 2.

Solução	Pesos					Resultados									
						Eficiências (%)									
	W_1	W_2	W_3	W_4	W_5	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	X_9	X_{10}
2.1	100	1	1	1	1	40	40	30	34	30	40	30	40	30	32
2.2	1	100	1	1	1	72	80	80	74	74	80	76	76	80	80
2.3	1	1	100	1	1	60	60	62	60	58	60	60	58	60	62
2.4	1	1	1	100	100	66	78	80	80	80	80	80	80	80	80

Solução	Pesos					Resultados									
						Vazões (m³/s)									
	W_1	W_2	W_3	W_4	W_5	Y_1	Y_2	Y_3	Y_4	Y_5	Y_6	Y_7	Y_8	Y_9	Y_{10}
2.1	100	1	1	1	1	0,100	0,200	0,120	0,110	0,100	0,110	0,200	0,200	0,200	0,100
2.2	1	100	1	1	1	0,100	0,120	0,110	0,120	0,120	0,130	0,170	0,160	0,120	0,100
2.3	1	1	100	1	1	0,200	0,200	0,240	0,200	0,190	0,200	0,200	0,150	0,200	0,230
2.4	1	1	1	100	100	0,110	0,140	0,200	0,110	0,160	0,140	0,120	0,130	0,130	0,190

Solução	Pesos					Resultados				
	W_1	W_2	W_3	W_4	W_5	Soma Efic. (%)	Soma Vazão (m³/s)	Ineguidade	Viol. Total de OD	Viol. Total de DBO
2.1	100	1	1	1	1	**346**	**1,44**	**3,09**	**0**	**95,94**
2.2	1	100	1	1	1	**772**	**1,25**	**1,25**	**0**	**8,31**
2.3	1	1	100	1	1	**600**	**2,01**	**0,28**	**0**	**71,85**
2.4	1	1	1	100	100	**784**	**1,43**	**2,77**	**0**	**8,94**

Os pesos adotados pelas instâncias 1.1 e 2.1 tem como objetivo reduzir os custos com as eficiências de tratamentos, e essas soluções foram as que apresentaram menores valores para a soma total das eficiências na melhor solução encontrada. Os

valores das eficiências variaram entre 30% a 40%, valores aproximados do valor mínimo para as eficiências.

As instâncias 1.2 e 2.2 tem como proposito reduzir a vazão dos efluentes e apresentaram redução na vazão de lançamento.

Os pesos adotados pelas soluções 1.3 e 2.3 tem como objetivo reduzir a inequidade entre usuários. A melhor solução encontrada pelos pesos adotados na solução 1.3 não houve inequidade entre os usuários, os efluentes ficaram com a mesma vazão e a mesma eficiência.

Os pesos adotados pelas soluções 1.4 e 2.4 são para aumentar a qualidade da água, adotando maiores pesos para W_4 e W_5. Com isso não houve violação de OD e pouca violação de DBO em relação as outras soluções.

Com isso podemos concluir que os pesos adotados foram atingiram seus objetivos nos dois cenários apresentados.

As figuras 5 e 6 ilustram, o resultado obtido para as concentrações de OD e DBO por trecho e cenário simulado. Nessas figuras, a cor em destaque representa a violação da resolução CONAMA 357/05 para classe 2, ou seja, OD inferior a 5 mg/L e DBO superior a 5 mg/L.

Tabela 7 - Concentração de OD (mg/L) e DBO (mg/L) para o Cenário 1.

Soluções	**Trecho 1**		**Trecho 2**		**Trecho 3**		**Trecho 4**		**Trecho 5**	
	OD	**DBO**	**OD**	**DBO**	**OD**	**DBO**	**OD**	**DBO**	**OD**	**DBO**
1.1	6,81	7,05	6,24	10,7	5,31	17,29	4,85	19,63	4,65	21,42
1.2	7,42	3,18	7,23	4,32	7,13	5,09	6,98	5,95	6,75	7,62
1.3	7,22	4,45	6,92	6,32	6,73	7,76	6,55	8,69	6,49	9,38
1.4	7,26	4,13	7,18	4,72	7,11	5,24	6,99	5,85	6,91	6,64

Tabela 8 - Concentração de OD (mg/L) e DBO (mg/L) para o Cenário 2.

Soluções	Trecho 1		Trecho 2		Trecho 3		Trecho 4		Trecho 5	
	OD	DBO	OD	DBO	OD	DBO	OD	DBO	OD	DBO
2.1	7,44	4,35	7,01	8,82	6,84	11,21	6,64	12,74	6,56	13,99
2.2	7,59	2,93	7,53	3,57	7,51	4,07	7,43	4,84	7,38	5,49
2.3	7,35	5,1	7,12	7,66	6,93	10,15	6,74	11,75	6,65	13,07
2.4	7,54	3,34	7,47	4,21	7,39	5,26	7,36	5,48	7,32	6,01
Soluções	**Trecho 6**		**Trecho 7**		**Trecho 8**		**Trecho 9**		**Trecho 10**	
	OD	**DBO**	**OD**	**DBO**	**OD**	**DBO**	**OD**	**DBO**	**OD**	**DBO**
2.1	6,57	14,88	6,02	17,54	5,96	19,21	5,86	21,43	5,8	21,1
2.2	7,37	8,83	7,21	6,41	7,21	6,91	7,24	6,92	7,23	6,76
2.3	6,64	14,14	6,35	14,5	6,43	14,59	6,45	15,17	6,35	15,71
2.4	7,33	6,31	7,23	6,23	7,26	6,32	7,28	6,45	7,22	6,85

De acordo com a Tabela 6, podemos concluir que apenas para a solução 1.1 houve violação da resolução CONAMA 357/05 para classe 2 para os valores de OD. Nos trechos 4 e 5 a concentração de OD foi inferior a 5 mg/L e em relação a outras instâncias, foi a que apresentou maior violação para a concentração de DBO. Com isso, podemos concluir que menores eficiências de tratamentos geram uma redução na qualidade da água.

Foi utilizado um algoritmo exaustivo, capaz de testar todas as possibilidades de valores para eficiências de tratamento e vazões definidas, possibilitando assim definir para cada cenário uma solução ótima global. Desse modo foi possível fazer uma comparação dos valores obtidos por meio do método e os resultados obtidos pela meta-heurística GRASP.

Os resultados obtidos para as eficiências e vazões do Cenário 1 são apresentados nas Tabela 8 e 9, em seguida, e é feito um comparativo dos resultados obtidos nas figuras 7 e 8.

Tabela 9 - Valores das eficiências (em %) obtidas pela meta-heurística GRASP e pelo método EXAUSTIVO para o Cenário 1

META-HEURÍSTICA GRASP	**X_1**	**X_2**	**X_3**	**X_4**	**X_5**	**SOMA**
1.1	34	32	34	30	30	160
1.2	78	76	78	78	60	370
1.3	80	80	80	80	80	400
1.4	78	80	80	80	78	396
MÉTODO EXAUSTIVO	**X_1**	**X_2**	**X_3**	**X_4**	**X_5**	**SOMA**
1.1	32	34	32	34	30	162
1.2	76	74	74	74	62	360
1.3	78	78	78	78	78	390
1.4	80	76	76	80	80	392

Tabela 10 - Valores das vazões (em m³/s) obtidas pela meta-heurística GRASP e pelo método EXAUSTIVO para o Cenário 1

META-HEURÍSTICA GRASP	**Y1**	**Y2**	**Y3**	**Y4**	**Y5**	**SOMA**
1.1	0,110	0,100	0,180	0,120	0,120	0,630
1.2	0,100	0,100	0,100	0,120	0,100	0,520
1.3	0,200	0,200	0,200	0,200	0,200	1,000
1.4	0,160	0,100	0,100	0,120	0,130	0,610
MÉTODO EXAUSTIVO	**X_1**	**Y2**	**Y3**	**Y4**	**Y5**	**SOMA**
1.1	0,110	0,110	0,160	0,110	0,120	0,610
1.2	0,110	0,100	0,110	0,120	0,100	0,540
1.3	0,200	0,200	0,200	0,200	0,200	1,000
1.4	0,110	0,120	0,110	0,120	0,120	0,580

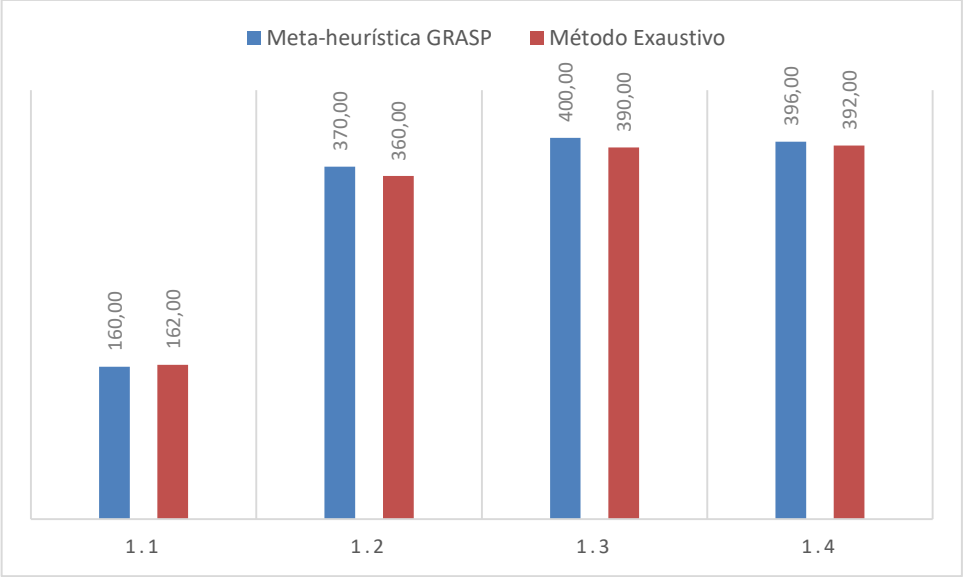

Figura 4 - Comparação entre as somas das eficiências obtidas entre a meta-heurística GRASP e o Método Exaustivo para o Cenário 1

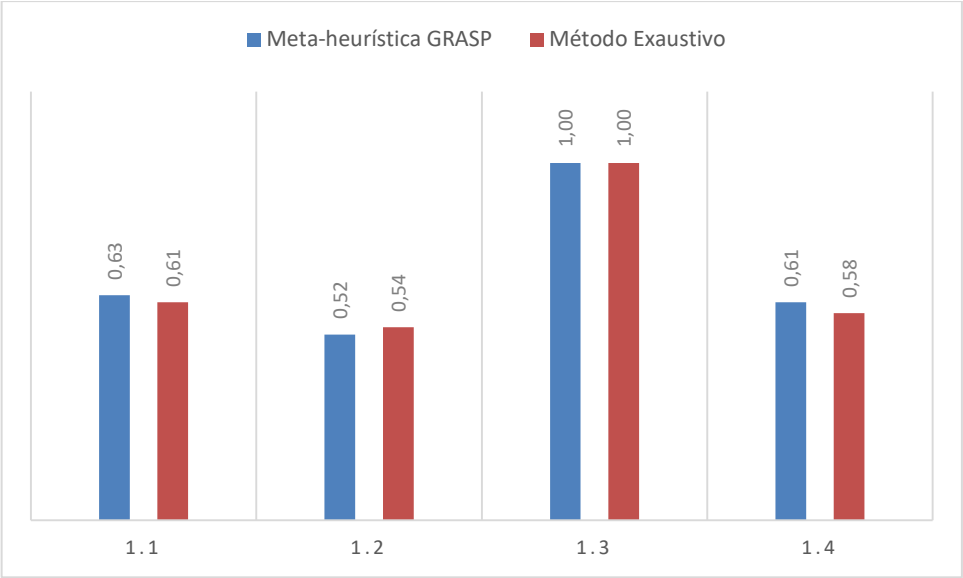

Figura 5 - Comparação entre a soma das vazões obtidas entre a meta-heurística GRASP e o Método Exaustivo para o Cenário 1

Tabela 11 - Média dos tempos de execução referentes a meta-heurística GRASP e o Método Exaustivo

Tempo de execução (s)	
Meta-heurística GRASP	**Método Exaustivo**
5×10^2	$8{,}6 \times 10^3$

A partir da simples inspeção na Tabelas 8 e 9 podemos notar que os valores encontrados nas melhores soluções encontrados pela meta-heurística GRASP para o Cenário 1 são próximos para os valores encontrados no método exaustivo e com um tempo computacional significativamente menor.

4. CONCLUSÕES

Este trabalho propôs a aplicação conjunta de modelos de otimização e modelagem de qualidade de água para apoio à seleção de eficiências e vazões de efluentes. O problema torna-se complexo quando são lançadas múltiplas cargas em corpos d'água com capacidades de assimilação distintas.

Para a resolução do problema foi implementado o *Greedy Randomized Adaptive Search Procedure* em conjunto com o modelo de qualidade de água Streeter-Phelps, que pela sua simplicidade vem sendo amplamente utilizado.

A partir dos resultados obtidos pode-se concluir que uso combinado de técnicas de otimização e modelos de qualidades das águas constitui alternativa eficiente para auxiliar na tomada de decisão e na gestão dos recursos hídricos, considerando os objetivos que se deseja alcançar.

5. REFERÊNCIAS

ALBERTIN, L. L. Técnica de gerenciamento da qualidade hídrica superficial baseada na otimização multiobjetivo. 2008. 193 f. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008.

ANDRADE, L. N. Modelo de otimização multiobjetivo para outorga de diluição de efluentes e enquadramento de corpos d'água. 2012. 157 f. Tese (Doutorado em Engenharia Ambiental) - Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória. 2012.

ANDRADE, L. N.; MAURI, G. R.; MENDONÇA, A. S. F. A general multiobjective model and a simulated annealing algorithm for waste load allocation. Journal of Water Resources Planning and Management, v. 139, p. 339-344, 2013.

ARAÚJO, A. F. Aplicação de meta-heurísticas para a solução do problema de programação de horários de irrigação.2010. Dissertação (Mestrado em Ciência da Computação). Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2010.

BRAGA, B. P. F. Técnicas de otimização e simulação aplicadas em sistemas de recursos hídricos. In: BARTH, F. T. (Org.). Modelos para gerenciamento de recursos hídricos. 1. ed. São Paulo: ABRH, 1987.

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.

CUNHA, M. C.; PINHEIRO, L.; AFONSO, P.; SOUSA, J. Decision-aid models for the implementation of the water framework directive. In: Proceedings of the 4th International Conference in Decision Making in Urban and Civil Engineering (CD Edition), Porto, Portugal, p. 10, 2004.

KIRKPATRICK, S.; GELATT, C.; VECCHI, M. Optimization by simulated annealing. *Science*, v. 220, n. 4598, p. 498-516, 1983.

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, v. 18, p. 277-286, 2013.

MACHADO, E. S. Utilização da metaheurística do recozimento simulado na otimização do planejamento de sistemas regionais de tratamento de efluentes e sua expansão da capacidade. 2009. 287 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Escola Politécnica de São Paulo, São Paulo. 2009.

OPPA, L. F. Utilização de modelo matemático de qualidade da água para análise de alternativas de enquadramento do Rio Vacacaí Mirim. 2007. 129 f. Dissertação

(Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2007.

PALMIERI, V.; CARVALHO, R. J. Qual2e model for the Corumbataí River. Ecological Modelling, n.1-2, v.198, p.269-275, 2006.

PASSOS, R. L. Seleção de eficiências de tratamento de esgotos a partir da utilização combinada de modelo de qualidade da água e de técnica meta-heurística de otimização. 2012. 70 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia Ambiental) - Universidade Federal do Espírito Santo, Espírito Santo. 2012.

RODRIGUES, R. B. SSD RB – Sistema de suporte a decisão proposto para a gestão quali-quantitativa dos processos de outorga e cobrança pelo uso da água. 2005. 179 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica de São Paulo, São Paulo. 2005.

SPERLING, V. M. (1996). Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos. 2 ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental - UFMG.

SPERLING, M. V. Estudos e modelagem da qualidade da água de rios, Universidade Federal de Minas Gerais; 2007. 588 p. v.7. Editora UFMG.

SPERLING, M. V. Análise dos padrões brasileiros de qualidade dos corpos d'água e de lançamento de efluentes líquidos, Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 3, n. 1, p. 111-132, 1998.

SONG, T.; KIM, K. Development of a water quality loading index based on water quality modeling. Journal of Environmental Management, n.3, v.90, p.1534-1543, 2009.