

Otimização do Planejamento de Sistemas Regionais de Tratamento de Efluentes Através de Simulação Monte Carlo e da Metaheurística do Recozimento Simulado

Enéas Souza Machado

Instituto das Águas do Paraná

sm.eneas@gmail.com

Monica Ferreira do Amaral Porto

Escola Politécnica/USP

mporto@usp.br

Eloy Kaviski

Universidade Federal do Paraná

eloy.dhs@ufpr.br

Recebido: 14/09/09 - revisado: 30/03/10 - aceito: 10/05/12

RESUMO

A modelagem de um sistema regional de tratamento de efluentes é apresentada como um programa de otimização inteira não linear. O modelo é solucionado por um módulo inicial de localização que, partindo de uma solução viável, faz pequenas alterações nas soluções anteriores até alcançar a solução ótima, de minimização de custos de construção e de O&M. O módulo hidráulico verifica a viabilidade dos arranjos propostos, através da minimização do bombeamento do sistema. A solução de ambos os modelos é efetuada através da metaheurística do recozimento simulado.

Palavras-Chave: Otimização, Simulação Monte Carlo, Recozimento Simulado, Sistema Regional de Saneamento.

INTRODUÇÃO

Com a entrada em vigor da lei nº 9.433, em janeiro de 1997, o Brasil iniciou um novo capítulo na história da gestão dos recursos hídricos. Novos instrumentos de gestão foram introduzidos, como os planos de bacia, a outorga de direito de uso, em especial a outorga de efluentes, e a cobrança pelo uso da água. Para a correta aplicação destes novos instrumentos, há necessidade do desenvolvimento de todo um ferramental técnico para apoiar a tomada de decisões. Por exemplo, no caso de Planos de Bacia, nota-se a necessidade da utilização de modelos de simulação, de quantidade e de qualidade, bem como da construção de critérios para elencar e hierarquizar as ações a serem efetuadas no âmbito do Plano. Mais do que simular, há necessidade de hierarquizar a implementação de tais ações e escaloná-las ao longo do tempo, com a utilização de modelos de otimização e de sistemas de apoio à tomada de decisões.

No caso das ações estruturais, certamente a que deverá receber maior atenção por parte dos Comitês de Bacia, será a melhoria da qualidade da água dos rios, através de várias medidas de despoluição, especialmente por meio da implantação de estações de tratamento de esgotos nos grandes centros urbanos do País. Segundo o IBGE (2004), no ano 2000, apenas 35% do esgoto coletado recebia tratamento. É sabido que o maior fator causador da poluição orgânica em nossos rios ainda são os esgotos domésticos. Por exemplo, de acordo com SUDERHSA (1999), na bacia do Alto Iguaçu, Região Metropolitana de Curitiba, dois terços da poluição dos rios é causada por esgotos domésticos, com o terço restante causado por fontes industriais e *runoff* urbano.

Desde o final do Plano Nacional de Saneamento - PLANASA, nos anos 70 do século passado, o Brasil ainda não construiu um novo arranjo institucional e financeiro para lidar com um problema destas dimensões. A regulação e efetiva implementação da lei federal nº 11.445 de janeiro de 2007, que instituiu a Política Nacional de Saneamento, podem

vir a ser os meios que propiciem a retomada do setor de saneamento. Qualquer que seja o arranjo institucional que se obtenha, os engenheiros, projetistas e os Comitês de Bacia deverão enfrentar a questão: obter o melhor arranjo físico regional, sujeito a restrições de qualidade da água e a restrições orçamentárias. E ainda, como implementar tais ações ao longo do tempo. Imagina-se que, modelos de simulação e de otimização serão ferramentas imprescindíveis para a tomada de decisões.

O presente trabalho visa contribuir com esse debate, estudando a aplicação da simulação Monte Carlo e da metaheurística do Recozimento Simulado na solução de um problema de otimização para a localização de Estações de Tratamento de Efluentes (ETEs) em uma bacia hidrográfica, visando a minimização de custos. O modelo será aqui denominado de Modelo Regional Estático. O equacionamento matemático de tal problema de otimização resulta em um modelo de Programação não Linear Inteiro. Utilizando-se da metaheurística do Recozimento, tal modelo é composto por duas partes: um modelo de otimização locacional, resolvido por Recozimento Simulado, que é alimentado por um Modelo Hidráulico que verifica a validade hidráulica das soluções propostas. Tal verificação é feita através da equação universal de perda de carga, com a obtenção das vazões nos tramos da rede através de simulação Monte Carlo e otimização também por Recozimento (os termos Recozimento Simulado ou Recozimento, serão utilizados de forma intercambiável ao longo deste trabalho).

O Sistema Regional é composto por um ou vários arranjos físicos, compostos de interceptores a gravidade ou sob pressão, Estações Elevatórias (EEs) e Estações de Tratamento de Efluentes (ETEs).

REVISÃO DOS MODELOS EXISTENTES

Seguindo a revisão bibliográfica de Machado, Cunha e Porto (2006), os modelos de otimização locacional para Estações de Tratamento de Efluentes, ETEs, podem ser divididos em dois grupos. Em primeiro lugar, estudos que tratam de ETEs individuais, onde se estuda a alocação ótima de cargas, a minimização de custos, considerações sobre equidade, sazonalidade de vazões de diluição etc. Em segundo lugar, estudos que envolvem ETEs regionais: sua localização, dimensionamento e alocação das cargas. Esses dois grupos podem ainda sofrer outras considerações: técnicas de otimização utilizadas, a consideração da qualidade da água do

corpo receptor, a condição estocástica das variáveis, e a dinâmica temporal na implantação das obras.

Talvez o primeiro estudo publicado seja devido a Lynn, Logan e Charnes (1960), onde se procura obter a melhor seqüência de tratamento de efluentes dentro de uma ETE. O problema é tratado como uma rede de fluxo e resolvido através de Programação Linear.

Deininger (1965) desenvolveu um dos primeiros modelos de otimização para ETEs individuais, baseado em Programação Linear. Dadas n fontes de lançamento, o objetivo é determinar a eficiência que cada ETE local deve ter, de modo a atender a carga limite de DBO a ser lançada em cada seção, a um custo de implantação total mínimo. A Função Objetivo (FOB) visa minimizar o custo de implantação das ETEs, supondo que o custo varie linearmente com o grau de tratamento.

Em Loucks & Lynn (1966) tem-se um dos primeiros trabalhos a introduzir o conceito de probabilidades, onde são obtidas concentrações mínimas de oxigênio dissolvido através de cadeias de Markov, e utilizando vazões mínimas de durações de 1, 2 e 3 dias. O modelo de otimização é de Programação Linear.

Já no campo das metaheurísticas, Burn e Yulanti (2001) utilizam Algoritmos Genéticos para a otimização de um modelo multiobjetivo. O primeiro, chamado “custo versus qualidade”, possui duas Funções Objetivo: minimizar custos de tratamento e minimizar o número de violações da qualidade da água (oxigênio dissolvido), através do modelo QUAL2E. O segundo modelo, chamado “custo versus equidade”, também com duas FOBs: minimiza custos e maximiza equidade, partindo do conceito que fontes com maior carga poluidora devem ter um nível maior de tratamento. O terceiro modelo trata de relaxar o nível de tratamento em épocas não críticas do ano, utilizando quatro opções de nível de tratamento, de 35% a 98%.

A partir de meados da década de 1970 os estudos desenvolvidos não se restringem somente à otimização de ETEs individuais. Brill e Nakamura (1978) com base em uma rede de fluxo, e custos do tipo *fixed charge*, utilizam Programação Inteira para minimizar custos de uma FOB linearizada, com restrições não lineares, a qual é resolvida pelo algoritmo de *branch and bound*.

Wang (1999) utilizou Algoritmos Genéticos para minimizar custos de um sistema regional de efluentes na alocação de cargas. A qualidade da água do corpo receptor foi obtida através de Redes Neurais Artificiais, que mimetizam o modelo de simulação da qualidade da água TOMCAT.

A aplicação da metaheurística do Recozimento Simulado na análise de sistemas regionais de tratamento de efluentes se deve a Souza et al (2002). O modelo para a otimização de sistemas regionais de efluentes é concebido como um modelo de Programação Inteira Mista, não Linear. Cunha et al. (2004), no sentido de apoio à implementação da Diretiva Quadro da Água, da União Européia, estenderam o modelo anterior, incluindo restrições sobre qualidade da água para os parâmetros oxigênio dissolvido, nitrogênio total, fósforo total e nitrogênio Kjeldahl, simulados através do modelo QUAL2E.

O ALGORITMO DE RECOZIMENTO SIMULADO

Deve-se a Metropolis et al (1953) o desenvolvimento original do Recozimento Simulado. No processo físico do Recozimento, a temperatura é inicialmente aumentada para permitir a mobilidade das moléculas. Na seqüência, a temperatura é lentamente baixada, quando então as moléculas se arranjam aleatoriamente até se alcançar um estado de baixa energia, correspondente a uma estrutura cristalina.

A seqüência de estados gerados pelo modelo de Metropolis é baseada em simulação Monte Carlo. Supondo que a energia do atual estado seja E_i , aplica-se um mecanismo de perturbação para gerar um estado j , cuja energia é E_j . Se $E_j - E_i \leq 0$, j será o novo estado. Se $E_j - E_i > 0$, j poderá ser aceito como o novo estado com uma probabilidade p dada por:

$$p = \exp(E_i - E_j) / k_B t \quad (1)$$

onde :

k_B : constante de Boltzmann ($1,38 \times 10^{-23}$ JK⁻¹)

t : temperatura (K)

A probabilidade p é então comparada com um número aleatório de distribuição uniforme sobre o intervalo [0,1].

Se $p > \text{random } [0,1] \rightarrow j$ será o novo estado

O algoritmo de Recozimento Simulado pode ser consultado em livros textos que tratam de metaheurísticas, como por exemplo, Aarts e Korst (1989) ou Glover e Kochenberger (2003). Esses autores definem os parâmetros do Recozimento, já

adaptados para o presente modelo, são:

- t_0 : temperatura inicial do processo: define o critério de aceitação de uma dada solução. Pela distribuição de Boltzmann, tem-se que:

$$t_0 = \Delta E / (k \ln p) \quad (2)$$

A variação de energia ΔE é a variação do valor da Função Objetivo que, no passo inicial, é o próprio valor da FOB inicial.

Trabalhou-se com uma probabilidade de aceitação de $p=0,5$ (Kaviski et al., 2007).

- f : fator de arrefecimento: representa a taxa na qual a temperatura é diminuída. Utilizou-se do valor $f = 0,9$, recomendado por Johnson et al.(1989); quanto mais lento for o arrefecimento melhor se dá a busca no espaço de soluções;
- $n1$: número mínimo de iterações feitas antes de se baixar a temperatura. Este parâmetro foi desdobrado em outros dois:
 - a temperatura é abaixada quando $n_1 > simmax$, que é o número máximo de simulações aceitas em uma mesma temperatura, ou
 - a temperatura decresce quando $nsuc > sucmax$, ou seja, quando o número de Funções Objetivo aceitas em uma mesma temperatura for maior que um dado valor $sucmax$.

Por sua vez, estes parâmetros de decréscimo de temperatura estão ligados à magnitude do problema e foram fixados da seguinte forma:

$simmax = 100 \times (\text{número de trechos})$ e

$sucmax = 10 \times (\text{número de trechos})$

- O número de decréscimos de temperatura também foi considerado ligado à magnitude do problema. Assim utilizou-se:

$n_2 = 5 \times (\text{número de trechos})$.

O MODELO REGIONAL ESTÁTICO

Solução proposta

O Modelo Regional Estático, partindo de uma rede cujos nós representam as fontes geradoras de efluentes e os possíveis locais para implantação

de ETEs, gera uma solução inicial que tem sua viabilidade hidráulica testada. Essa viabilidade hidráulica é feita através da minimização de uma primeira Função Objetivo que descreve o bombeamento do sistema, minimizando a potência necessária ao mesmo. Se a rede proposta for hidráulicamente viável (capaz de, dentro dos diâmetros disponíveis, suportar a vazão alocada, seja com escoamento livre ou sob pressão), então se obtêm os custos de uma segunda Função Objetivo, onde agora se quer minimizar custos monetários de transporte (interceptores e condutos sob pressão), de estações elevatórias (EEs) e estações de tratamento de efluentes (ETEs). A partir dessa solução inicial, geram-se soluções candidatas, por sua vez também testadas quanto ao mínimo custo de bombeamento/viabilidade hidráulica e mínimo custo total até a obtenção de uma solução pseudo ótima.

O modelo matemático geral (já englobando o Modelo Hidráulico) é aqui formulado como um problema de Programação Inteira Mista Não Linear, à semelhança do apresentado por Souza et al (2002). A FOB expressa a minimização dos custos totais de instalação, operação e manutenção de tubulações, Estações Elevatórias (EEs) e Estações de Tratamento de Efluentes (ETEs).

A definição matemática da Função Objetivo e das restrições requer as seguintes definições de variáveis e constantes:

x_{ij} : variável binária: $x_{ij} = 1$, se o diâmetro do interceptor ligando o nó i ao nó j for $\neq 0$,
 $x_{ij} = 0$, caso contrário;

y_k : variável binária: $y_k = 1$, se existir ETE no nó k ,
 $y_k = 0$, caso contrário;

z_l : variável binária: $z_l = 1$, se existir EE no nó l ,
 $z_l = 0$, caso contrário;

N : número total de nós: $1, \dots, i, j, \dots, N$ (inclui nós que representam fontes de efluentes, e nós com possíveis localizações para as ETEs);

$1, \dots, n$: nós com fontes de efluentes;

$n+1, \dots, N$: nós para possíveis localizações de ETEs;

$m+1, \dots, N$: nós para possíveis localizações de EEs;

L_{ij} : extensão de interceptor entre os nós i e j (m);

QE_i : vazão de efluentes gerada no nó i (m^3/s);

Q_j : vazão no interceptor ou conduto forçado entre os nós i e j (m^3/s);

$QETE_k$: vazão tratada na ETE k (m^3/s);

QEE_l : vazão na elevatória EE l (m^3/s);

E_i, E_j : carga hidráulica nos nós i e j , respectivamente (m);

$CTUB_{ij}$: custo de instalação, operação e manutenção de interceptor ou conduto forçado ligando o nó i ao nó j (R\$/m);

$CETE_k$: custo de instalação, operação e manutenção de ETE no nó k (R\$/m 3);

CEE_l : custo de instalação, operação e manutenção de EE no nó k (R\$/CV).

A Função Objetivo é então definida como:

$$\begin{aligned} \text{Min} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N C_{ij}(Q_{ij}, L_{ij}, x_{ij}) + \sum_{k=n+1}^N CETE_k(QT_k, y_k) + \\ \sum_{l=m+1}^N CEE_l(QEE_l, E_l, z_l) \end{aligned} \quad (3)$$

sujeita às seguintes restrições:

- a) equação da continuidade para os nós com fontes de efluentes:

$$QE_i + \sum_{j=1}^N Q_{ji} = \sum_{j=1}^N Q_{ij} \quad \forall i = 1, \dots, N \quad (4)$$

- b) equação da continuidade para as ETEs:

$$\sum_{j=1}^N Q_{jk} - \sum_{j=1}^N Q_{kj} = QETE_k \quad \forall k = n+1, \dots, N \quad (5)$$

- c) equação da continuidade para as EEs:

$$\sum_{j=1}^N Q_{jl} - \sum_{j=1}^N Q_{lj} = QEE_l \quad \forall l = m+1, \dots, N \quad (6)$$

- d) restrição de que todo o esgoto produzido na região seja tratado:

$$\sum_{i=1}^N QE_i = \sum_{k=n+1}^N QETE_k \quad (7)$$

- e) restrição de vazão máxima nas ETEs:

$$QETE_k \leq QETE \max_{k,y_k} \quad (8)$$

$$\forall k = m+1, \dots, N$$

f) restrição {0,1} para coletores:

$$x_{ij} \in \{0,1\} \quad (9)$$

$$\forall i = 1, \dots, N; \forall j = 1, \dots, N$$

g) restrição {0,1} para ETEs:

$$y_k \in \{0,1\} \quad (10)$$

$$\forall k = n+1, \dots, N$$

h) restrição {0,1} para EEs:

$$y_l \in \{0,1\} \quad (11)$$

$$\forall l = m+1, \dots, N$$

i) restrição de não-negatividade de vazões nas ETEs:

$$QT_k \geq 0 \quad (12)$$

$$\forall k = n+1, \dots, N$$

j) restrição de não-negatividade de vazões para os interceptores e condutos sob pressão:

$$Q_{ij} \geq 0 \quad (13)$$

$$\forall i = 1, \dots, N; \forall j = 1, \dots, N$$

Embora a formulação matemática do modelo seja semelhante àquela de Souza et al. (2002), a solução aqui proposta é bastante diferente. Tem-se um “modelo externo” de localização, otimizado através de Recozimento, onde diâmetros são alterados e trechos são passíveis de eliminação. E tem-se um “modelo interno”, que faz a verificação hidráulica de cada arranjo proposto no modelo de localização. O modelo hidráulico aqui adotado, baseado na equação universal de perda de carga, é genérico, permitindo qualquer sentido de fluxo para as redes propostas. Tal fato transforma o cálculo hidráulico em um problema adicional de otimização, com solução inicial obtida por simulação Monte Carlo e soluções viáveis obtidas através de um segundo ciclo de Recozimento.

A rede inicial proposta pelo modelo de localização ao modelo hidráulico é composta por todos

os trechos inicialmente informados, e todos com os diâmetros comerciais máximos informados. O processamento é encerrado se não houver solução hidráulica. Em havendo solução, será aquela resultante de uma minimização das alturas de bombeamento, através de um processo de Recozimento do Modelo Hidráulico, obtendo-se vazões em cada trecho e eventuais alturas de bombeamento. Esta será a solução inicial do modelo externo, que terá sua FOB calculada. É dado início ao processo de Recozimento agora no modelo de localização, com a adoção de soluções candidatas, sua verificação hidráulica e sua aceitação ou não, conforme o valor da Função Objetivo. De acordo com o critério de Metropolis, soluções piores podem ser aceitas, evitando que se caia em mínimos locais. As soluções candidatas são obtidas pelo sorteio aleatório, onde se introduz uma pequena perturbação na solução atual. Esta perturbação é feita através do sorteio de um ou mais trechos, onde é feita a variação de diâmetros, um degrau para cima e para baixo na tabela de diâmetros comerciais. Note-se que a variação para baixo pode chegar ao diâmetro zero, ou seja, eliminação daquele trecho.

O MODELO HIDRÁULICO

A partir das redes e diâmetros fornecidos a cada passagem pelo Modelo Estático Regional, o Modelo Hidráulico obtém as vazões e verifica a viabilidade hidráulica daquela rede. No modelo geral aqui apresentado permite-se ligação entre todos os arcos e também que estas ligações tenham qualquer sentido, independentemente das cotas dos nós, ou seja, permitem-se escoamentos tanto a gravidade como sob pressão.

Quando se permite um duplo sentido de fluxo em todos os trechos da rede, o número de soluções viáveis torna-se muito grande. Assim, adotou-se uma metodologia de sentido de fluxo e de cálculo das vazões tal que se minimize a potência total de bombeamento nos trechos sob pressão.

São conhecidos:

- os nós que representam a localização das fontes pontuais e respectivas vazões de efluentes, bem como dos nós de localização de potenciais sítios para as ETEs;
- todas as ligações possíveis entre nós que representam a localização das cargas e nós que representam a localização de ETEs exis-

- tentes ou passíveis de implantação, independentemente da cota topográfica dos nós;
- cotas e distâncias entre nós que representam as fontes pontuais e possíveis localizações de ETEs;

São variáveis a serem estimadas:

- as vazões dos interceptores que ligam os nós de fontes pontuais ou que ligam fontes a nós que possam abrigar ETEs;
- o diâmetro comercial dos interceptores e condutos sob pressão;

A seguir descreve-se o algoritmo proposto:

Passo 1: leitura de dados

- para os i nós ler: z_i , qa_i , e qdI_i e $qd2_i$;
- matriz de adjacências a_{ij} com $i,j = 1,...,nn$, que relaciona nós e trechos da rede;
- comprimento dos trechos l_i , com $i = 1,...,nt$ (m);
- tabela de diâmetros comerciais d_i , com $i = 1,...,nd$ (m).

Passo 2: determinação dos parâmetros de cada trecho para cada diâmetro tabelado:

a) parâmetro Δz_i :

dados os nós de início e fim de cada trecho, $n1_i$ e $n2_i$, respectivamente, com $i = 1,...,nt$; é uma convenção adotada no modelo para saber que, quando o fluxo se dá de n_1 para n_2 , será por gravidade:

$$z[n_{1i}] \geq z[n_{2i}] \quad (14)$$

b) parâmetro tno_{ij} (define os trechos que saem de cada nó)

Sendo $1 \leq |tno_{ij}| \leq nt$, o sinal deste parâmetro é determinado pela condição

$$\text{Se } z[n1_i] > z[n2_j] \quad (15) \\ \text{então } tno_{ij} > 0 \\ \text{senão } tno_{ij} < 0$$

O sinal identifica se a vazão do trecho pode atingir o nó por efeito da gravidade ou não.

c) parâmetro de perda de carga unitária

$$\frac{\Delta H_i}{L} = \frac{8a}{g\pi^2 D_i^5} Q^{2+b} \quad \text{com } i=1,...,nd \quad (16)$$

As constantes a e b são obtidas através da solução de um sistema de equações lineares do tipo $f=aQ^b$, onde f é o fator de resistência (método proposto por Streeter, 1978). São calculadas para todos os diâmetros D_i , todos os trechos L_i da rede e para as vazões mínima Q_1 (1% de Q_2), sendo Q_2 a vazão máxima por gravidade para cada diâmetro comercial considerando um escoamento com 80% do diâmetro.

d) vazão máxima por gravidade Qm_{ij} para todos os trechos e diâmetros, determinada através da equação de Darcy-Weisbach e pela equação universal de perda de carga (Henderson, 1966):

$$Qm_{ij} = \alpha_{ij} \sqrt{f_{ij}} \quad (17)$$

$$i = 1,...,nt; \quad j = 1,...,nd, \text{ onde:}$$

$$\alpha_{ij} = \left(\frac{8gRh_j A_j^2 \Delta z_i}{L_i} \right)^{1/2} \quad (18)$$

$$\frac{1}{\sqrt{f_{ij}}} = -0,8686 \ln \left(\frac{\varepsilon}{14,83Rh_j} + \frac{0,63vA_j}{Rh_j \alpha_{ij}} \right) \quad (19)$$

Passo 3: busca da solução inicial pseudo-ótima por simulação Monte Carlo

Seja ind_i com $i=1,...,nt$ o índice dos diâmetros comerciais com $0 \leq ind_i \leq nd$

a) para $i=1,...,2000$ (parâmetro de iteração $nit1$):

a.1) sortear a ordem dos nós para realizar a verificação da equação da continuidade (definida pela variável ocn_k , com $k=1,...,nn$)

a.2) para $j=1,...,200$ (parâmetro de iteração $nit2$):

- iniciar aleatoriamente as vazões nos trechos considerando a ordem de cálculo ocn_k ($k=1,...,nn$);

- verifica a capacidade das ETEs:

- sim: calcular $S = \sum_{k=1}^{Nt} Q_k H_k$

- não:faz $j=j+1$

A solução inicial adotada será a primeira so-

lução hidráulicamente viável obtida nos dois ciclos de iteração, e cujas vazões atendam às capacidades das ETEs.

Passo 4: Cálculo de $H_k \quad k=1,...,nt$

Para $k=1,...,nt$:

- se $Q_k > Qm_k$
- então

$$h = l_k rsl_{indk} Q_k^{nindk}$$

se $h > \Delta z_k$ então $H_k = h - \Delta z_k$
 senão $H_k = 0$

- senão

se $Q_k < 0$
 então $h = l_k rsl_{indk} |Q_k^{nindk}|$
 onde rsl_{indk} e n_{indk} são parâmetros

$$H_k = h + \Delta z_k$$

senão $H_k = 0$

Passo 5: aplicação do algoritmo de Metropolis para busca da solução ótima. Mantendo a configuração da rede fixa, alteram-se as vazões obtidas na solução inicial, de modo a minimizar a soma dos bombeamentos:

$$S = \sum_{k=1}^{Nt} Q_k H_k \quad (20)$$

Onde S é a soma dos bombeamentos na rede, com vazões Q (m³/s) e alturas de bombeamento H (m).

Seja:

$$n_2 = 10x(n^{\circ} \text{ de trechos com diâmetro} > 0)$$

$$\text{simmax} = 200 \quad n_2$$

$$\text{scumax} = 20 \quad n_2$$

$$t_0 = 0,0144QHT_{OT}$$

Onde:

t_0 : temperatura inicial de reconhecimento;

QHT_{OT} : valor da variável $\text{MIN}(S)$ do Passo 3, valor mínimo do bombeamento;

a) Solução Inicial: aquelas obtidas com $\text{MIN}(S)$ do passo 3.

b) Solução candidata: faz-se uma pequena alteração nas vazões obtidas na solução inicial/actual. São conhecidos:

- na_k : n° de trechos com vazões a serem calculadas a partir do nó k ;
- nb_k : n° de trechos com vazões conhecidas

quando analisamos o nó k ;

- são identificados os trechos;
- na otimização adota-se a mesma ordem de cálculo obtida para a solução inicial viável.

Sorteia-se um dos nós i , e a partir deste nó, e com a equação da continuidade, calculam-se as vazões em na_i trechos:

$$S = Q_{ai} + \sum_{j=1}^{Nbi} Q_{bi,j} = \sum_{k=1}^{Nai} S_{ai,k} \quad (21)$$

onde:

Qa_{ik} : vazões desconhecidas dos trechos que saem do nó i ;

Qb_{ik} : vazões conhecidas dos trechos que saem do nó i .

S: variável auxiliar

$$Qa_{ik} = PERC_{i,k} S$$

$$\sum_{k=1}^{nai} PERC_{i,k} = 1$$

com $PERC_{i,k}$ vindo da solução inicial/actual.
 E a alteração é dada por:

$$PERC'_{i,k} = PERC_{i,k} + 0,1u \quad \text{para } k=1,...,na_i \text{ e } u \sim U[0,1]$$

$$S = \sum_{k=1}^{nai} PERC'_{i,k} \quad (22)$$

$$\text{e} \quad PERC''_{i,k} = \frac{PERC'_{i,k}}{S} \quad (23)$$

APLICAÇÃO DO MODELO REGIONAL ESTÁTICO

O modelo foi aplicado a um exemplo (aqui chamado de “bacia exemplo”) apresentado por Souza e Cunha (1999), embora não com intuito de comparar resultados, visto a diferente formulação no caso da verificação hidráulica. Funções de custos para Estações de Tratamento, Estações Elevatórias e tubulações foram desenvolvidas com base em custos finais de obras executadas na Região Metropolitana de Curitiba. As funções de custos são:

Para estações elevatórias:

$$C = 149.089,08P^{1,502} \quad (24)$$

Onde

C: custo em reais

P: potência (CV)

Para as ETEs:

$$C = a * Qb \quad (25)$$

Onde:

C: custos em R\$/m³

Q: vazão em m³/s

a,b: parâmetros da função, definidos pelo tipo de tratamento utilizado:

UASB: a=22.429.142,68; b=1,277

UASB + Lagoa:a=22.429.142,68; b=0,777

UASB + Flotação: a=137.815.149,71; b=1,504

A figura 1 apresenta uma rede composta de 8 nós de produção de efluentes e 3 possíveis localizações para as ETEs e respectivas distâncias entre os nós.

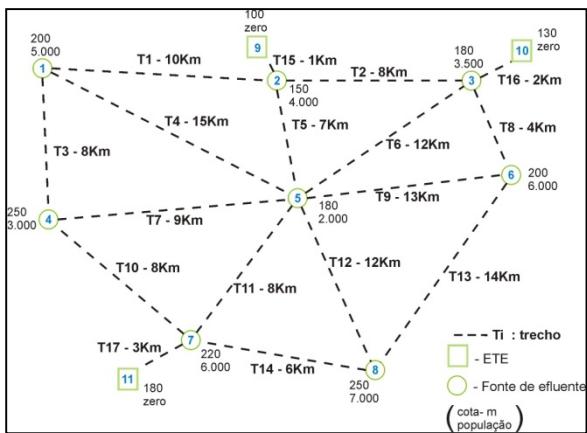


Figura 1 – Rede para a bacia exemplo do Modelo Regional Estático.

O resultado obtido é apresentado na figura 2. A solução de menor custo remete todos os efluentes para a ETE localizada no nó 9, com todos os trechos com escoamento a gravidade, a um custo de R\$42.074.804,61.

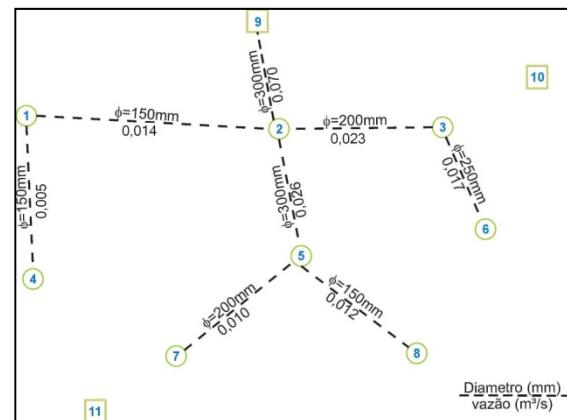


Figura 2 – Rede resultante para o exemplo 1

Os dois exemplos a seguir mostram a flexibilidade do modelo O exemplo 2 utiliza a mesma configuração da “bacia exemplo” anterior. Foram alteradas algumas distâncias entre nós: 6 e 3 para 2 km, entre os nós 8 e 6 para 5 km e entre os nós 3 e 10 para 1 km. O resultado obtido é mostrado na figura 6.12, com a solução de construção de 3 ETEs, a um custo de R\$126.734.539,85.

Já no exemplo 3, forçou-se a existência de uma ETE junto ao nó 10, com vazão mínima de 0,02 m³/s. Para tentar evitar uma solução com uma ETE junto ao nó 11, este foi afastado do nó 7, e colocado numa mesma cota. Já o nó 7 foi aproximado dos nós 4,5,8. Após algumas tentativas obteve-se uma solução com duas ETEs, junto aos nós 10 e 9, como mostra a Figura 4. O custo da solução é de R\$85.650.023,80.

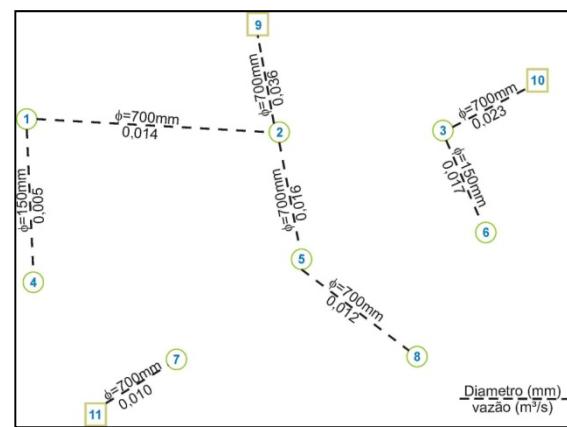


Figura 3 – Rede resultante para o exemplo 2

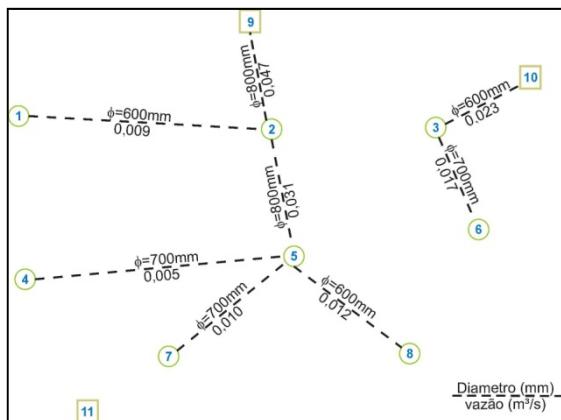


Figura 4 – Resultado do Exemplo 3

Os exemplos acima comprovam a utilidade do modelo quando da simulação de diferentes situações. O tempo de processamento é relativamente longo, cerca de 48 horas, para os exemplos acima, em função da utilização de simulação Monte Carlo para a obtenção da solução inicial para o Modelo Hidráulico. O presente modelo também foi estendido para estudar a capacidade de expansão de um sistema regional, assim verificando não apenas o espaço regional como também a ampliação temporal do sistema. Este Modelo Dinâmico pode ser encontrado em Machado (2009).

CONCLUSÕES

O presente trabalho pretende ser apenas o início de uma linha de pesquisa que utilize metaheurísticas como o Recozimento Simulado na solução de problemas de otimização na área de recursos hídricos. Há necessidade de desenvolver aspectos tais como:

- Funções de custo, especialmente na área de saneamento devem ser objeto de pesquisas sistemáticas, seja no meio acadêmico, seja junto às próprias empresas de saneamento e/ou entidades governamentais. Já existe um conhecimento básico sobre custos de instalação de infra-estrutura, porém custos de Operação e Manutenção não são sistematicamente levantados e, provavelmente, hoje sejam bastante subestimados. O próprio custo global de uma empresa de saneamento deveria ser rigorosamente estimado

e ter uma parcela alocada como custo de O&M dos sistemas de abastecimento e esgotamento.

- O modelo hidráulico apresentado permite que a rede inicial e suas diversas configurações candidatas sejam bastante genéricas, em especial quanto à possibilidade de se ter fluxos em qualquer sentido da rede e permitir escoamentos a gravidade e sob pressão. Entretanto sua modelagem hidráulica é bastante complexa, envolvendo a obtenção de soluções iniciais por simulação e uma otimização por Recozimento Simulado, que exigem elevados tempos de processamento.
- Faz-se também necessária uma calibração mais detalhada dos parâmetros do Recozimento Simulado e dos níveis de iteração necessários nos modelos hidráulicos.
- Uma recomendação bastante óbvia para futuros autores é a utilização de estações de trabalho, que podem reduzir significativamente os tempos de processamento.
- Outras metaheurísticas, tais como a Colônia de Formigas, devem ser estudadas e comparadas com o Recozimento Simulado.

AGRADECIMENTOS

O primeiro autor agradece à CAPES pela bolsa sanduíche e à Profª Drª Maria Conceição Cunha, do Departamento de Engenharia Civil, da Universidade de Coimbra, Portugal, pelas primeiras idéias para o doutorado.

REFERÊNCIAS

- AARTS, E., KORST, J. *Simulated annealing and Boltzman machines*, Wiley-Interscience series in discrete mathematics and optimization, 1989. p. 272.
- BRILL, E.D., Jr., NAKAMURA, M. A branch and bound method for use in planning regional wastewater treatment systems. *Water Resources Research*, Washington, v.14, n.1, p.109-118, 1978.
- BURN, D.H., YULANTI, J.S., Waste-load allocation using genetic algorithms. *Journal of Water Resources Planning and Management*, Reston, v. 127, n. 2, p. 121-129.,

- CUNHA, M. C., PINHEIRO, L., AFONSO, P., SOUZA, J., 2004. Decision-aid Models for the Implementation of the Water Framework Directive, DMUCE, CD Edition, Porto, 2001. 10p.
- DEININGER, R.A. Water Quality Management: The Planning of Economically Optimum Pollution Control Systems. *Proceedings*. First Annual Water Resources Conf., Chicago, American Water Resources Association, p. 254-282, 1965.
- GLOVER, F., KOCHENBERGER, G. (editors), *Handbook of Metaheuristics*, Kluwer Academic Publishers, 2003. p.557.
- HENDERSON, F.M., *Open Channel Flow*. McMillan, 1966. 522p.
- JOHNSON, D.S., ARAGON, C.R., MCGEOCH, L.A., SCHEVON, C., Optimization by simulated annealing: an experimental evaluation; part I, graph partitioning. *Operations Research*, v.37, n.6, p.865-892, 1989.
- LOUCKS, D.P., LYNN, W.R. Probabilistic Models for Predicting Stream Quality. *Water Resources Research*. Washington, v.2, n.3, p.593-605, 1966.
- KAVISKI, E., CUNHA, L.M., LAMBROS, D., GARCIA, C.S. Parametrização de curvas de intensidade de precipitação pelo método do recozimento simulado. *Anais do XVII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*, ABRH, São Paulo. 2007.
- LYNN, W.R., LOGAN, J.A., CHARNES, A., Systems analysis for planning wastewater treatment plants. *Journal of the Water Pollution Control Federation*, Middleburg, v.34, n.6, p.565-581, 1962.
- IBGE – Instituto Brasileira de Geografia e Estatística. *Atlas de Saneamento*. Rio de Janeiro: IBGE, 2004. 151p.
- 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. 266f. Tese (Doutorado) - Universidade de São Paulo, 266p, 2009.
- MACHADO, E. S., CUNHA, M.C., PORTO, M. Otimização de sistemas regionais de sistemas de tratamento de efluentes e seu impacto na qualidade da água: uma revisão. *Revista REGA*, v.3, n. 1, p. 57-71, 2006.
- METROPOLIS, N.; ROSENBLUTH, M.; ROSENBLUTH, A.; TELLER A.; TELLER, E. Equations of state calculations by fast computing machines. *Journal of Chemical Physics*, v. 21, p.1087-1092, 1953.
- SOUZA, J.; RIBEIRO, A.; CUNHA, M.C.; ANTUNES, A. An optimization approach to wastewater systems planning at the regional level. *Journal of Hydroinformatics*, vol.4, n.2, p. 115-123, 2002.
- STREETER, V.L. *Mecânica dos Fluidos*. São Paulo: McGraw Hill, 1978.
- SUDERHSA. Cadastro de usos e usuários de recursos hídricos na Região Metropolitana de Curitiba. 1999.
- WANG, C. *An objective approach to regional wastewater-treatment planning*. 1999. 174f. Dissertation D.Phil - University of Newcastle upon Tyne, 1999.

Planning Optimal Regional Effluent Systems With Monte Carlo Simulation and Simulated Annealing

ABSTRACT

This paper presents the modeling of a regional sewage treatment system as a non linear integer program. The model has a hydraulic module that verifies the viability of the proposed systems, and a second module that minimizes the construction and O&M costs of the system. The optimization of both modules is accomplished by the use of the simulated annealing metaheuristic.

Key-words: Optimization, Monte Carlo Simulation, Simulated Annealing, Regional System of Sanitary Engineering.