

PANORAMA DA APLICAÇÃO DA ANÁLISE DE SISTEMAS NO PLANEAMENTO DE DIFERENTES SISTEMAS HÍDRICOS

Maria da Conceição M. O. CUNHA¹

RESUMO

Numa perspectiva de desenvolvimento sustentável, as intervenções a realizar para a obtenção e/ou protecção dos recursos hídricos deve ser objecto de um processo de planeamento em que todos os aspectos (físicos, orçamentais, ambientais, tecnológicos, etc.) sejam devidamente considerados. Para o sucesso desses trabalhos de planeamento tem contribuído a cada vez maior utilização das técnicas de análise de sistemas. As abordagens sistémicas têm, com efeito, permitido que sejam construídos modelos exprimindo claramente o objectivo das intervenções e que traduzem todos os aspectos que caracterizam os problemas a resolver. Nestas abordagens é possível integrar as análises e os resultados provenientes de sectores com diferentes linguagens (como os relativos aos aspectos económicos e aos aspectos físicos).

Por outro lado, o conjunto de técnicas disponíveis para a obtenção das soluções óptimas, a partir dos modelos construídos, é hoje bastante largo, possibilitando resolver modelos que representam rigorosamente a realidade. De facto, podem assim ser evitadas simplificações que outrora eram necessárias para esse efeito, tendo como consequência a diminuição de credibilidade dos resultados.

Nesta comunicação vai traçar-se um panorama da aplicação da análise de sistemas realizadas em diferentes tipos de sistemas hídricos: sistemas aquíferos, sistemas de distribuição de água, sistemas de drenagem e tratamento de águas residuais, sistemas de armazenamento/barragens. A apresentação de alguns exemplos (sintéticos) de diferentes sistemas hídricos vai permitir, por um lado, evidenciar como se mostra atractiva a utilização da análise de sistemas e, por outro lado, tornar claros alguns aspectos relativos à formulação dos modelos decisionais, e à respectiva implicação nas formas de resolução. Os modelos seleccionados dizem, deliberadamente, respeito a situações diversas – uns são de exploração, outros de localização e/ou dimensionamento; uns são contínuos, outros discretos, etc.

Palavras Chave: análise de sistemas, sistemas aquíferos, sistemas de distribuição, sistemas de drenagem e tratamento, sistemas de armazenamento.

¹ Doutora em Engenharia Civil. Professora Coordenadora - Instituto Superior de Engenharia de Coimbra - IPC. Investigadora do IMAR - DEC Universidade de Coimbra.
ISEC - Quinta da Nora - 3000 Coimbra.

1- INTRODUÇÃO

A utilização dos recursos hídricos que a natureza nos proporciona é realizada, em geral, à custa de grandes investimentos. De facto, a instalação e a exploração das infraestruturas necessárias para se poder dar resposta às solicitações decorrentes dos diferentes tipos de consumos, envolvem grandes gastos de dinheiros públicos.

Numa perspectiva de desenvolvimento sustentável, as intervenções a realizar para a obtenção e/ou protecção dos recursos hídricos deve ser objecto de um processo de planeamento em que todos os aspectos (físicos, orçamentais, ambientais, tecnológicos, etc.) sejam devidamente considerados. Para o sucesso desses trabalhos de planeamento tem contribuído a cada vez maior utilização das técnicas de análise de sistemas. As abordagens sistémicas têm, com efeito, permitido que sejam construídos modelos exprimindo claramente o objectivo das intervenções e que traduzem todos os aspectos que caracterizam os problemas a resolver. Nestas abordagens é possível integrar as análises e os resultados provenientes de sectores com diferentes linguagens (como os relativos aos aspectos económicos e aos aspectos físicos).

Por outro lado, o conjunto de técnicas disponíveis para a obtenção das soluções óptimas, a partir dos modelos construídos, é hoje bastante largo, possibilitando resolver modelos que representam rigorosamente a realidade. De facto, podem assim ser evitadas simplificações que outrora eram necessárias para esse efeito, tendo como consequência a diminuição de credibilidade dos resultados.

Nesta comunicação vai traçar-se um panorama das aplicações da análise de sistemas realizadas em diferentes tipos de sistemas hídricos: sistemas aquíferos, sistemas de distribuição de água, sistemas de drenagem e tratamento de águas residuais, sistemas de armazenamento/barragens.

Procura-se analisar quais os principais problemas que ocorrem quando se pretende estabelecer e resolver os modelos decisionais correspondentes às intervenções sobre tais sistemas. Sumariam-se, ainda, contribuições constantes na literatura relativas a estes temas.

2 - A APLICAÇÃO A DIFERENTES SISTEMAS HÍDRICOS

2.1 - Considerações gerais

Os problemas a resolver no âmbito do planeamento de recursos hídricos envolvem decisões quanto à localização, traçado e dimensionamento das infraestruturas necessárias para providenciar os recursos na quantidade e com a qualidade desejáveis, e garantir a adequada protecção ambiental. Essas infraestruturas podem ter várias finalidades (captação, distribuição, armazenamento, drenagem, tratamento, irrigação, protecção contra cheias, etc.) e a respectiva exploração terá de ter em consideração as condições naturais reais (que como sabemos apresentam grandes variações no tempo e no espaço).

A resolução destes dois aspectos - instalação das infraestruturas e respectiva exploração - não deve ser dissociada, a solução adoptada para a instalação das infraestruturas terá grandes consequências na futura exploração.

Contudo, trata-se de problemas de natureza diversa, cuja representação sistémica dá lugar a modelos de características diferentes. Por isso, as duas questões têm vindo a ser tratadas separadamente, considerando um aspecto parametricamente em relação ao outro. No que diz respeito à instalação de infraestruturas, os modelos característicos são modelos não-lineares de natureza combinatória; no que diz respeito à exploração os modelos característicos são, também, não-lineares, mas mais raramente (ou só) combinatórios.

Normalmente, os primeiros são determinísticos, sendo a instalação das infraestruturas realizada assumindo conhecidos os valores de exploração correspondentes a valores médios (ou com outra probabilidade) quanto à ocorrência dos recursos e quanto à sua procura. Por vezes, consideram-se modelos probabilísticos, se estiver em causa a incerteza quanto a custos, fiabilidade dos materiais, etc.

Os modelos de exploração são frequentemente estocásticos, e tomam como conhecida a infraestrutura, sendo importantes as séries temporais das variáveis hidrológicas e, eventualmente, das procuras.

A boa abordagem é, segundo julgamos, a de tomar simultaneamente decisões sobre a instalação das infraestruturas e sobre a sua exploração. Naturalmente para compatibilizar os dois tipos de modelos, as decisões a obter sobre a exploração dirão respeito às condições de funcionamento que forem julgadas representativas (podendo vir a ser posteriormente ajustadas após simulações de diferentes tipos de valores para as variáveis em causa).

Mesmo usando esta abordagem, os problemas continuam a ser de difícil resolução. De facto, as funções objectivo e as restrições a considerar nos modelos decisionais contêm habitualmente termos não-lineares de natureza combinatoria (as funções objectivo, incluem, por vezes, objectivos contraditórios).

A resolução dos modelos não-lineares contínuos tem sido realizada através de programas baseados nos métodos de gradiente (GRG(ABADIE (1978) e MINOS (MURTAGH e SAUNDERS (1983))).

A resolução dos modelos não-lineares combinatoriais oferece grandes dificuldades, não existindo métodos gerais com eficiência equivalente para o efeito. A utilização dos métodos de gradiente deixa de ser válida, dado as funções deixarem de ser deriváveis em todo o seu domínio, uma vez que passam a incluir variáveis discretas. Foram tentadas várias abordagens, desde simplificações tornando os modelos ou lineares ou não-lineares contínuos até heurísticas especializadas, mas os resultados obtidos em situações reais foram pouco convincentes.

Recentemente as evoluções havidas no domínio da investigação operacional levaram à construção de heurísticas - algoritmos genéticos, algoritmo de recozimento simulado, etc. - que se mostram bastante prometedoras para a resolução destes problemas.

A apresentação de alguns exemplos (sintéticos) de diferentes sistemas hídricos vai permitir, por um lado, evidenciar como se mostra atractiva a utilização da análise de sistemas e, por outro lado, tornar claros alguns aspectos relativos à formulação dos modelos decisionais e às respectivas implicações nas formas de resolução. Os modelos seleccionados dizem, deliberadamente, respeito a situações diversas - uns são de exploração, outros de localização e/ou dimensionamento; uns são contínuos, outros discretos, etc.

2.2 - Sistemas Aquíferos

Um modelo representativo de exploração de um sistema aquífero, do qual se pretende extrair um dado caudal a custo mínimo, poderá ser formulado da seguinte maneira:

$$\min_{QE} \sum_{i=1}^{NM} c_e (R_i + HN_i) QE_i \quad (1)$$

s.a.

$$R_i = \sum_{j=1}^{NM} a_{j,i} QE_j, \quad \forall i = 1, \dots, NM$$

(2)

$$\sum_{j=1}^{NM} a_{j,i} QE_j \leq R_{\max i}, \quad \forall i = 1, \dots, NM$$

(3)

$$\sum_{j=1}^{NM} QE_j = Q_{tot}$$

(4)

$$QE_j \leq QE_{\max j}, \quad \forall j = 1, \dots, NM$$

(5)

$$QE_j \geq 0, \quad \forall j = 1, \dots, NM$$

(6)

NM : número total de locais disponíveis para captação; QE_j : caudal a extrair na captação j ; R_i : rebaixamento no local i ; HN_i : diferença entre o nível inicial do aquífero e o nível do solo; $a_{j,i}$: coeficiente de influência da captação j sobre o local i (exprime o rebaixamento no local i em consequência da extracção de um caudal unitário em j (MADDOCK(1972))); $R_{\max i}$: rebaixamento máximo no local i ; Q_{tot} : caudal total solicitado; $QE_{\max j}$: caudal máximo que se pode extrair na captação j ; c_e : custo de elevar a unidade de caudal por unidade de altura.

A função (1) exprime a minimização dos custos da extracção do caudal total solicitado. Esta função é quadrática na variável de decisão QE .

As restrições (2) asseguram que o rebaixamento em cada local seja consequência das extracções em todas as captações.

As restrições (3) asseguram que o rebaixamento em cada um dos locais seja não superior ao valor máximo R_{\max} .

A restrição (4) assegura que o caudal solicitado seja satisfeito.

As restrições (5) asseguram que numa captação o caudal extraído seja não superior a QE_{\max} .

As restrições (6) são restrições de não-negatividade.

Neste modelo, o comportamento físico do aquífero é representado através dos coeficientes de influência. Este conceito só é estritamente válido para aquíferos confinados, cujo comportamento é linear (ou seja, é válido o princípio da sobreposição de efeitos). Nos aquíferos freáticos, só em determinadas condições se poderá usar a hipótese de comportamento linear. Não sendo aceitável essa hipótese há que usar a discretização numérica das equações diferenciais que traduzem o escoamento, o que poderá tornar o modelo decisional bastante mais pesado, especialmente se se tratar de uma exploração em regime não permanente. Outro aspecto relativo às condições de escoamento, que poderá complicar o modelo decisional, diz respeito à incerteza relativa aos parâmetros do aquífero

(transmissividade, coeficiente de armazenamento). Nesses casos poderá haver necessidade de recorrer a modelos probabilísticos.

O modelo descrito é um modelo de exploração, onde apenas são tomados em consideração os custos de energia (as infraestruturas são supostas existir à partida). Se se tratasse da decisão em relação à instalação aquelas, teriam de ser contabilizados os correspondentes custos fixos. O problema tornar-se-ia não-linear de natureza combinatória, com as inerentes dificuldades de resolução. Todos estes aspectos têm condicionado fortemente as técnicas de resolução a adoptar em problemas deste tipo.

A literatura mostra como se tem evoluído neste domínio. GORELICK (1983), AHLFELD (1986), WILLIS e YEH (1987) apresentam uma extensa revisão da literatura no que diz respeito à aplicação de métodos clássicos de optimização.

Nos últimos seis anos assistiu-se a uma evolução, com a aplicação das heurísticas recentes mencionadas. Em CUNHA (1996), CUNHA (1997) e MCKINNEY e LIN (1994) são referidos alguns dos trabalhos mais interessantes realizados nesta área

2.3 - Sistemas de distribuição

Uma parte importante dos sistemas de abastecimento de água é constituída pelas redes de distribuição.

O problema do dimensionamento óptimo, ou seja, o problema de determinar a solução de mínimo custo para uma rede supondo conhecido o seu traçado, tem vindo a ser investigado nos últimos 20 anos.

As redes malhadas são aquelas que apresentam maior complexidade. De facto nestas redes são várias as distribuições de caudais (para os mesmos valores de caudais nos nós) que satisfazem as equações de equilíbrio hidráulico. Importa saber qual a que corresponde à rede de custo mínimo.

O modelo que se apresenta seguidamente diz respeito a um problema deste tipo.

$$\min_D \sum_{k=1}^{NP} C_k(D_k)L_k \quad (7)$$

s.a.

$$\sum_{i=1}^{NP_{in,n}} Q_i - \sum_{j=1}^{NP_{out,n}} Q_j = S_n, \forall n = 1, \dots, NN \quad (8)$$

$$\sum_{k=1}^{NP_j} \Delta H_k = 0, \forall l = 1, \dots, NL \quad (9)$$

$$\Delta H_k = H_{1,k} - H_{2,k} = w \frac{L_k}{CF_k^a D_k^b} Q_k |Q_k|^{a-1}, \quad \forall k = 1, \dots, NP \quad (10)$$

$$H_n \geq H_{nmin}, \quad \forall n = 1, \dots, NN \quad (11)$$

$$D_k \geq D_{\min}, \quad \forall k = 1, \dots, NP$$

(12)

$$D_k \in \{D\}, \quad \forall K = 1, \dots, NP$$

(13)

NN : número de nós da rede; NL : número de malhas da rede; NP : número de condutas da rede; NP_l : número de conduta da malha l ; $NP_{in,n}$, $NP_{out,n}$: número de condutas que entram e que saem do nó n , respectivamente; D_k : diâmetro da conduta k ; $C_k(D_k)$: custo da conduta de k ; Q_i : caudal na conduta i ; L_k : comprimento da conduta k ; S_n : caudal solicitado no nó n ; DH_k : perda de energia na conduta k ; H_n : energia no nó n ; H_{nmin} : energia mínima no nó n ; D_{min} : diâmetro mínimo; $\{D\}$: conjunto de diâmetros comerciais; CF : coeficiente da perda de carga da fórmula de Hazen-Williams na conduta k ; \mathbf{a} , \mathbf{b} : expoentes da fórmula de Hazen-Williams para a conduta k .

A função objectivo (7) exprime a minimização dos custos das condutas que formam a rede de distribuição.

As restrições (8) exprimem a equação de continuidade nos nós da rede.

As restrições (9) exprimem a equação de conservação de energia nas malhas da rede.

As restrições (10) exprimem a perda de energia em cada da conduta.

As restrições (11) asseguram que a energia em cada nó seja não inferior a H_{\min} .

As restrições (12) asseguram que o diâmetro das condutas seja não inferior a D_{\min} .

As restrições (13) asseguram que o diâmetro das condutas seja escolhido entre os diâmetros comerciais contidos no conjunto $\{D\}$.

Este modelo não-linear na função objectivo e nas restrições contém variáveis discretas relativas aos diâmetros, o que o torna de natureza combinatoria. O facto de se fazer a escolha dos diâmetros a usar entre a gama disponível no mercado, leva à consideração dos diâmetros como variáveis discretas.

Embora esta formulação não inclua nem acessórios nem reservatórios, a sua consideração não alteraria a natureza do modelo.

Tendo como base a ideia de que a resolução deste problema passa pela determinação da distribuição de caudais que conduz à rede de custo mínimo, ALPEROVITS e SHAMIR (1997) apresentaram uma metodologia em que, através de um processo iterativo, envolvendo programação linear e um método de gradiente, era encontrada a distribuição de caudais desejada. WALSKI (1985) e GOULTER (1992) sumariam uma extensa revisão dos métodos de optimização na resolução destes problemas.

Também nestes sistemas se assistiu, nos últimos anos, à aplicação das heurísticas baseadas em métodos de pesquisa aleatória (referência aos seus autores em CUNHA e SOUSA (1997)).

Os aspectos relacionados com a variabilidade de consumos e fiabilidade das redes (dois aspectos que o modelo anterior não considera) tem merecido destaque na investigação realizada nos últimos anos (ver MAYS et al., 1989, QUIMPO e SHAMSI, 1991 e SCHNEIDER et al., 1996)

2.4 - Sistemas de drenagem e tratamento de águas residuais

A resolução dos problemas de colecta e tratamento de esgotos a nível regional, pode passar pela construção de uma ou várias estações de tratamento, havendo assim maior ou menor número de reagrupamentos nas redes de colectores. A melhor solução será aquela que tiver custo mínimo, certamente tirando partido das economias de escala de diferentes níveis que exibem as funções de custo de uma e outra infraestruturas.

O modelo que se segue corresponde ao estabelecimento da rede de drenagem e à localização de estações de tratamento que permitirão resolver, a custo mínimo, o problema de drenagem e tratamento de esgotos para uma dada região.

$$(14) \quad \min_{QQ, QT} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N C_{ij}(QQ_{ij}) + \sum_{k=m+1}^N C_k(QT_k)$$

s. a.

$$(15) \quad \sum_{j=1}^N QQ_{ji} - \sum_{j=1}^N QQ_{ij} = -QR_i, \quad \forall i = 1, \dots, n$$

$$(16) \quad \sum_{j=1}^N QQ_{ji} - \sum_{j=1}^N QQ_{ij} = 0, \quad \forall i = n+1, \dots, m$$

$$(17) \quad \sum_{j=1}^N QQ_{jk} - \sum_{j=1}^N QQ_{kj} = QT_k, \quad \forall k = m+1, \dots, N$$

$$(18) \quad QQ_{ij} \geq 0, \quad \forall i = 1, \dots, m; \quad \forall j = 1, \dots, m$$

$$(19) \quad QT_k \geq 0, \quad \forall k = m+1, \dots, N$$

N : número total de nós da rede; n : índice dos centros de rejeição (em número de n); $n+1, \dots, m$: índices dos nós de reagrupamento intermédio; $m+1, \dots, N$: índices dos nós correspondentes a possíveis localizações de estações de tratamento; QQ_{ij} : caudal transportado do nó i ao nó j ; $C_{ij}(QQ_{ij})$: custo de transportar o caudal do nó i ao nó j ; QT_k : caudal tratado na estação k ; $C_k(QT_k)$: custo de tratar o caudal QT_k ; QR_i : caudal de águas residuais produzido no centro de rejeição i .

A função objectivo (14) exprime a minimização dos custos da rede de colectores e das estações de tratamento a implantar.

As restrições (15), (16) e (17) exprimem a equação de continuidade nos centros de rejeição, nos nós de reagrupamento intermédio e nas estações de tratamento respectivamente.

As restrições (18) e (19) são restrições de não negatividade.

A formulação deste modelo implica que os custos estejam estabelecidos em função dos caudais transportados e tratados. Dessa forma é evitada a consideração das variáveis discretas relativas aos diâmetros. É também evitada a formulação combinatória no que diz respeito aos custos fixos de implantação das estações de tratamento. Por outro lado, os aspectos relativos aos custos de tratamento têm como hipótese que, em cada estação, é proporcionado o mesmo nível de tratamento. Este modelo poderia ser complementado com um outro representando o meio aquático onde seria realizada a rejeição dos efluentes tratados e a partir do qual seria possível determinar os níveis de tratamento em cada estação em função, por exemplo, da capacidade autodepuradora do meio receptor (TYTECA et al. (1992)).

Também nestes sistemas se notam diferentes possibilidades de formulação e conseqüente resolução. MELO e CÂMARA (1994) apresentam um levantamento muito completo das abordagens em causa.

2.5 - Sistemas de armazenamento/barragens

As barragens são infraestruturas de enorme importância para a utilização dos recursos hídricos. A sua construção pode ter diversas finalidades.

O modelo formulado de seguida corresponde à maximização dos benefícios líquidos a obter pela construção de uma barragem destinada a realizar descargas para irrigação, consumo público e produção de energia. Em caso de não cumprimento das metas requeridas quanto às descargas, verifica-se um déficit a que se associa uma penalização (correspondente, por exemplo, a perdas de produção agrícola).

$$\max_{DC_i, DC_s, DC_p, V} \left\{ \sum_{t=1}^T [(B_t(DC_i, DC_s, Hp_t(DC_p)) - PN_t(DF_i, DF_s, DF_p))] \right\} - C(V) \quad (20)$$

s.a.

$$A_{t+1} = A_t + P_t + I_t - EV_t - DC_t - DCE_t, \quad \forall t = 1, \dots, T \quad (21)$$

$$DC_{t+1} = DC_i + DC_s + DC_p, \quad \forall t = 1, \dots, T \quad (22)$$

$$DC_i \leq DC_{i_{\max}}, \quad \forall t = 1, \dots, T \quad (23)$$

$$DC_s \leq DC_{s_{\max}}, \quad \forall t = 1, \dots, T \quad (24)$$

$$Hp_t \leq Hp_{\max}, \quad \forall t = 1, \dots, T \quad (25)$$

$$DFi_t \leq DEi_{\max} - DEi_t, \quad \forall t = 1, \dots, T$$

(26)

$$DFs_t \leq DEs_{\max} - DEs_t, \quad \forall t = 1, \dots, T$$

(27)

$$DFp_t \leq Hp_{\max} - ef \cdot g \cdot DCp_t \cdot HU_t, \quad \forall t = 1, \dots, T$$

(28)

$$A_t \leq V, \quad \forall t = 1, \dots, T$$

(29)

$$DCi_t, DCs_t, DCp_t, DFi_t, DFs_t, DFp_t, V \geq 0, \quad \forall t = 1, \dots, T$$

(30)

T : número de períodos em análise; DCi_t : descargas realizadas para irrigação; DCs_t : descargas realizadas para consumo público; DCp_t : descargas realizadas para produção de energia; $Hp_t(DCp_t)$: potência gerada em função da descarga; V : volume de armazenamento da barragem; DFi_t : déficit de descarga, em relação á descarga requerida para irrigação; DFs_t : déficit de descarga, em relação á descarga requerida para consumo público; DFp_t : déficit de descarga, em relação á descarga requerida para produção de energia; A_t : armazenamento da barragem; HU_t : carga disponível (que poderá ser dada em função do estado de armazenamento da barragem); DCE_t : excesso de descarga, em relação às descargas requeridas (pode tornar-se necessária, se a capacidade de armazenamento não puder contê-la); B_t : benefícios relativos às descargas realizadas para irrigação, consumo público e produção de energia; PN_t : penalidade pelo não cumprimento das descargas requeridas; C : custo da barragem; EV_t : evaporação na barragem; P_t : precipitação; I_t : caudais que afluem à barragem; DCi_{\max} : descarga requerida para irrigação; DCs_{\max} : descarga requerida para consumo público; Hp_{\max} : Potência máxima requerida; ef : eficiência do grupo hidroeléctrico; γ : peso volúmico da água. Todas as variáveis dizem respeito ao período genérico t .

A função objectivo (20) exprime a maximização dos benefícios produzidos pela construção de uma barragem, a partir da qual vão ser realizadas descargas para irrigação, consumos públicos e produção de energia eléctrica. Os benefícios e as penalizações são supostos dados em valores actualizados.

As restrições (21) exprimem a equação de continuidade na barragem.

As restrições (22) exprimem que a descarga total é igual às descargas requeridas para irrigação, consumo público e produção de energia.

As restrições (23) e (24) asseguram que as descarga para irrigação e consumo público sejam não superiores ao requerido respectivamente.

As restrições (25) asseguram que a potência gerada seja não superior à potência requerida.

As restrições (26) e (27) exprimem o déficit em função das descargas requeridas e realizadas para irrigação e consumo público respectivamente.

As restrições (28) exprimem o déficit de potência em função da potência requerida e da potência gerada.

As restrições (29) asseguram que o armazenamento seja não superior ao volume da barragem.

As restrições (30) são as restrições de não negatividade.

O modelo apresentado poderá ser linear ou não-linear dependendo das características das relações estabelecidas para os benefícios e penalidades e ainda para a carga disponível. Esta deverá ser função do estado de armazenamento da barragem no início e no fim do período em análise. Estas funções, bem como aquelas que permitirão determinar a evaporação em função da área superficial do volume armazenado, tornarão (se se pretender um modelo realista) o problema não-linear.

A estrutura sequencial das decisões (um período a seguir ao outro) deste problema levaram a que muitas vezes fosse usada programação dinâmica para a sua resolução.

Este modelo está formulado como determinístico, mas as variáveis hidrológicas que contém aconselhariam o uso de uma formulação probabilística. Em CUNHA (1995) são apresentados diversos casos em que é usada a formulação referida.

A consideração de aspectos estocásticos na resolução destes problemas tem sido conseguida de duas maneiras diferentes: ou através da resolução para um grande número de períodos usando as séries históricas das variáveis hidrológicas; ou através da introdução do conceito de probabilidade no próprio modelo. Os primeiros modelos são referidos como implicitamente estocásticos e os segundos como explicitamente estocásticos.

Extensas revisões da literatura podem ser encontradas em LOUCKS et al. (1982), YEH (1985), SIMONOVIC(1992), MAYS e TUNG (1992) e MAYS (1996).

3 - CONCLUSÕES

Os modelos apresentados revelam a versatilidade da análise de sistemas no planeamento de sistemas de recursos hídricos. A análise de sistemas constitui uma ferramenta capaz de lidar com as múltiplas facetas dos problemas de planeamento de recursos hídricos. Esta ferramenta é cada vez mais utilizada, em problemas reais, para o que tem contribuído os fortes desenvolvimentos teóricos recentes e o significativo aumento das capacidades de cálculo.

A necessidade de construção de um modelo decisional contribui, por si só, para uma clarificação e uma sistematização do problema a resolver. Hoje caminha-se no sentido da construção de modelos decisoriais reflectindo todos os aspectos dos problemas reais, não sendo necessárias as simplificações excessivas que, no passado, punham em causa os resultados obtidos.

Estando em causa o dispêndio de dinheiros públicos e de recursos comunitários, será desejável que as decisões a tomar sejam as decisões óptimas. Uma visão sistémica permitirá contribuir, certamente, para um melhor aproveitamento dos recursos hídricos, com menores gastos de recursos financeiros e mais de acordo com os bons princípios do desenvolvimento sustentável.

BIBLIOGRAFIA

ABADIE, J.- *The GRG method for nonlinear programming*. H.J. Greenberg (Editor). Design and implementation of optimization software. Sijthoff & Noordhoff, Alphen-aan-den-Rijn , 1978, pp. 335-362.

AHLFELD, D. P.- Designing contaminated groundwater remediation systems using numerical simulation and nonlinear optimization. Ph.D. dissertation. Dep. of Civ. Eng, Princeton Univ., Princeton , N.J., 1986.

ALPEROVITS, E., AND SHAMIR, U.- "Design of optimal water distribution systems." *Water Resour. Res.*, 1977. 13(6), 885-900.

CUNHA, M.C.M.O.-"Reservoir Systems Analysis in Water Resources Planning", *Hydroelectric Power Plants*, Edited by J.S. Marques and J.L.P.Lima, , 1995, 57-76.

CUNHA, M.C.M.O.- "O Planeamento e a Gestão de Sistemas Aquíferos: Breve Síntese das Principais Linhas da Investigação Actual", Seminário "Recursos Hídricos Subterrâneos em Portugal: Quantidade e Qualidade", A.P.R.H., LNEC, 1996.

CUNHA, M.C.M.O.- "Sobre a Utilização de Algoritmos de Pesquisa Aleatória na Gestão de Sistemas Aquíferos", *Actas do 3º Simpósio de Hidráulica e Recursos Hídricos dos Países de Língua Oficial Portuguesa*, Vol 1, Comunicação 16, Maputo. , 1997.

CUNHA, M.C.M.O. E SOUSA, J.O.- "Simulated Annealing Algorithms for Water Distribution Systems Optimization", EURO XV-INFORMS XXXIV Joint International Meeting, Barcelona, 1997.

GORELICK, S. M.- "A review of distributed parameter groundwater management modeling methods". *Water Resour*, 1983, *Res.*, 19(2), 305- 319.

GOULTER, I.- "Systems analysis in water distribution system design: from theory to practice." *J. of Wat. Resour. Plan. and Manage.*, ASCE, 1992,118(3), 238-248.

LOUCKS, D. P., STEDINGER J. R. E HAITH D. A.- *Water Resource Systems Planning and Analysis*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1981.

MADDOCK III, T.-" Algebraic Technological Function from a Simulation Model". *Water Resources Research* 4, 1972, pp. 129-134.

MAYS, L.W., BAO, Y., BRION, L., CULLINANE, M.L., DUAN, N., LANSEY, K., SU, Y.-C, AND WOODBURN, J.-"New methodologies for reliability-based analysis and design of water distribution systems". *Tech. Rep. CRWR-227*, Cent. for Res. in Water Resour., of Eng. Res., Univ. of Tex. at Austin, 1989.

MAYS, L. W., TUNG Y.K.-*Hydrosystems Engineering & Management*, McGraw-Hil, Inc., New York,. 1992.

MAYS, L. W.-*Water Resources Handbook*, McGraw-Hil, Inc., New York, 1996.

MCKINNEY, D. C., LIN, M.-D.- "Genetic algorithm solution of groundwater management models". *Water Resour. Res.*30(6), 1897-1906, 1994

MELO, J.J., CÂMARA, A.S.-"Models for the optimization of regional wastewater treatment systems", *Eur. J. of Opr. Res.*, 1994, 73, 1-16.

MURTAGH, B. A., E M. A. SAUNDERS-*MINOS 5.1 user's guide*. Syst. Optimiz. Lab. Tech. Rep. SOL. 83-20R. Departement of Operations Research, Stanford University, Stanford.1985.

QUIMPO, R.G., AND SHAMIR, U.M., -"Reliability-based distribution system maintenance". *J. Water Resour. Plann. Manage.*, 1991,117, 321-329.

SCHNEITER, C.R., HAIMES, Y.Y., LI, D. AND LAMBERT, H.-"Capacity reliability of water distribution networks and optimum rehabilitation decision making". *Water Resour. Res.*, 32(7), 1996, 2271-2278.

SIMONOVIC, S.P.-" Reservoir Systems Analysis: Closing Gap Between Theory and Practice". *J. of Wat. Resour. Plan. and Manage.*, ASCE, 1992, vol. 118. n° WR3, 262-280.

TYTECA D. E CUNHA, M.C.M.O.- "Modèles de Gestion du Traitement des Eaux Résiduaires d'un Bassin de Rivière - Proposition d'Applications et de Recherches", Université Catholique de Louvain, 1992.

WALSKI, T.M.-"State-of-the-art: pipe network optimization." *Computer applications in water resources*, Buffalo, N.Y, 1985.

WILLIS, R. L., E W. W. G. - *Yeh-Groundwater Systems Planning and Management*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N. I., 1987.

YEH, W. W.-G.- "Reservoir Management and Operations Models: A State-of-the-Art Review". *Water Resour. Res.*, 21(12), 1987, 1797-1818.