

ASPECTOS DA APLICAÇÃO DO *DELFT HYDRAULICS 'SOBEK'* NO DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE GESTÃO OPERACIONAL DA ÁGUA EM ALQUEVA

José L. S. Pinho

Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho, Braga Portugal, tel: 351+253604725, jpinho@civil.uminho.pt

José M. P. Vieira

Professor Catedrático do Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho, Braga Portugal, tel: 351+253604722, jvieira@civil.uminho.pt

RESUMO

No âmbito do desenvolvimento de um Sistema de Suporte à Decisão (SSD) para a gestão da água no Empreendimento de Fins Múltiplos de Alqueva (EFMA) foi seleccionado, após uma avaliação de diferentes alternativas de *software* de modelação hidrodinâmica e de qualidade da água, o programa *SOBEK* (WL, 2005) para a modelação de problemas de qualidade da água unidimensionais. No presente trabalho apresentam-se as características mais importantes deste programa e descrevem-se os principais aspectos relacionados com a sua integração no ambiente hidroinformático em desenvolvimento para a gestão operacional das infra-estruturas, construídas e em fase de projecto, da rede primária do Subsistema de Alqueva a montante da barragem de Alvito.

A construção do modelo hidrodinâmico foi precedida de um estudo pormenorizado das infra-estruturas que constituem o sistema em análise, com recurso a informação constante dos seus projectos de execução. A caracterização geométrica das infra-estruturas foi desenvolvida com o detalhe correspondente ao de projecto de execução (ou levantamento no caso de infra-estruturas existentes), distinguindo-se duas situações físicas distintas: albufeiras e sistemas adutores. No caso das albufeiras consideraram-se os seguintes elementos de projecto: fundo ou topografia do terreno; planta correspondente aos níveis relevantes; cortes; características das barragens; descarga de fundo e de caudal ecológico; descarregadores intermédios; descarregadores de cheia. No caso dos canais, túneis e condutas em pressão consideraram-se os seguintes elementos de projecto: planta com traçado do eixo; perfil longitudinal; secções transversais e acessórios.

Palavras-chave: Hidroinformática, qualidade da água, modelos matemáticos, estruturas hidráulicas.

1 INTRODUÇÃO

No Empreendimento de Fins Múltiplos de Alqueva (EFMA), uma grande variedade de aspectos relacionados com a gestão da água e com a sua qualidade estão dependentes dos fluxos de água naturais e artificiais em cenários de escassez, de aumento da procura de água e de condicionantes de protecção ambiental. Para os usos previstos mais significativos (irrigação, consumo humano e produção de energia eléctrica) é necessário construir cenários de disponibilidade de água em quantidade e qualidade adequadas. O EFMA prevê uma área de irrigação que beneficiará uma área total de cerca de 115 000 ha. Irá consistir em 15 barragens de regularização, 314 km de canais, 31 reservatórios de regularização, 56 estações elevatórias secundárias, 2240 km de túneis e aproximadamente 1000 km de vias de comunicação.

O aumento das capacidades de computação, por um lado, e a necessidade de abordagens integradas para a gestão de recursos hídricos, por outro, exige, actualmente, o desenvolvimento de plataformas computacionais que permitam a utilização de diferentes tipos de modelos para a obtenção de simulações dos diferentes processos envolvidos no ciclo hidrológico de forma eficiente e, simultaneamente, a integração de informação proveniente de estações de monitorização automática (EDIA, 2002).

A modelação matemática tem vindo a adquirir uma importância crescente como método de estudo e como ferramenta de previsão dos processos envolvidos no ciclo hidrológico. A elevada complexidade deste ciclo conduziu, nos últimos anos, a uma abordagem especializada no desenvolvimento (no que se refere aos meios hídricos e escalas espaciais e temporais dos processos modelados) das diferentes ferramentas de modelação. Desta forma, as soluções a adoptar para as plataformas tecnológicas de modelação, têm necessariamente que considerar a inclusão de diferentes tipos de modelos: modelos hidrológicos, modelos hidrodinâmicos e modelos de qualidade da água. Estes modelos utilizam diferentes tipos de *software* seleccionados após uma avaliação criteriosa das diferentes opções disponíveis. Estão em fase de criação modelos hidrodinâmicos e de qualidade da água de dimensionalidade distinta: unidimensionais no plano horizontal (1DH), bidimensionais no plano horizontal (2DH) e tridimensionais (3D).

No presente trabalho apresentam-se as principais características do software *SOBEK* (WL, 2005) e descrevem-se as principais tarefas para a sua utilização numa plataforma informática baseada em ambiente *Web*. Este software é utilizado na criação de modelos hidrodinâmicos e de qualidade da água unidimensionais de albufeiras, canais, linhas de água e na criação de modelos hidrológicos. Apresentam-se, ainda, alguns resultados preliminares obtidos com um modelo hidrológico e um modelo hidrodinâmico de um canal de ligação entre duas albufeiras pertencentes às infra-estruturas da rede primária do EFMA.

2 SISTEMA DE SUPORTE À DECISÃO ODeAnA

O Sistema de Suporte à Decisão (VIEIRA, J.M.P. e PINHO, J.L.S. 2002) para a Gestão da Água no Empreendimento de Fins Múltiplos de Alqueva (*ODeAnA* – Operação, Decisão e Análise para a Gestão da Água em Alqueva) pretende contribuir para um desempenho eficaz da Empresa de Desenvolvimento e Infra-estruturas de Alqueva (EDIA) na gestão da água na região de influência do empreendimento de Alqueva, conforme preconizado pela Directiva Quadro da Água (UE, 2000), reforçam-se, desta forma, competências da empresa nesta área.

O *ODeAnA* pretende constituir-se como uma ferramenta essencial para a descrição, planeamento, estabelecimento de alternativas, tomada de decisão e gestão corrente do EFMA. A sua aplicação constitui um *case study* representativo e interessante de gestão de uma sub-bacia internacional com eventual e desejável comparação e validação à escala europeia.

Na criação, aplicação e utilização de modelos hidráulicos e de qualidade da água é indispensável um conhecimento aprofundado dos processos modelados, das formulações matemáticas em que são baseados os programas utilizados e das técnicas numéricas a que recorrem para a obtenção de soluções. Estas exigências constituem uma das principais dificuldades na construção de plataformas de modelação de sucesso que permitam uma utilização das ferramentas de modelação como auxiliares de suporte à decisão na gestão de sistemas de recursos hídricos. Com o sistema de modelação em desenvolvimento procura-se uma solução em que o utilizador final não necessite de dominar todas as matérias necessárias à criação de um determinado modelo mas, por outro lado, que os resultados obtidos apresentem a necessária fiabilidade para serem considerados nas opções de gestão das infra-estruturas. Assim, durante a criação dos diferentes modelos, as opções na criação do modelo são todas decididas por especialistas na área e tendo presente o objectivo final. Aspectos como a decisão sobre o tipo de modelo mais adequado a um determinado processo hidrológico e meios hídrico, a discretização espacial dos modelos, a definição das condições de fronteira e os valores dos parâmetros de calibração só serão estabelecidos pelo utilizador final de forma parcial quando tal se verificar adequado. Na maioria das situações este terá apenas que definir valores para condições de fronteira a partir de um intervalo pré-estabelecido e para o qual o modelo foi previamente validado. A operação dos modelos é realizada a partir de interfaces especificamente desenvolvidas para o efeito em ambiente *Web*.

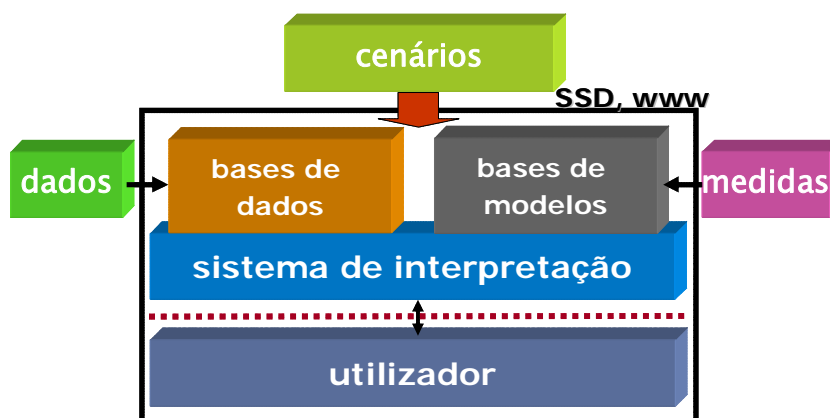


Figura 1 Integração dos modelos no SSD.

3 INFRA-ESTRUTURAS E SISTEMAS NATURAIS A MODELAR

As áreas a irrigar estendem-se pela bacia hidrográfica do Rio Sado e do Rio Guadiana (Figura 2). Os modelos desenvolvidos estão organizados em dois grandes grupos: modelos de sistemas naturais e modelos de infra-estruturas.

3.1 Sistemas naturais

Incluem-se nos sistemas naturais os modelos hidrológicos e os modelos de cursos de água principais. Dadas as limitações de informação necessária à implementação dos modelos hidrológicos, para além do modelo hidrológico relativo à totalidade da bacia hidrográfica na secção de Pulo do Lobo (Figura 3 a)), são considerados mais dois modelos: um modelo hidrológico que compreende todas as sub-bacias entre a secção da foz do rio Caia e a secção de Pulo do Lobo (Figura 3 b)) que permitirá fazer simulações hidrológicas considerando as aflúências do Guadiana à entrada do território nacional e o outro relativo à sub-bacia do rio Degebe (Figura 3 c)) e que será utilizado como protótipo na definição de informação de base necessária à calibração dos modelos de âmbito territorial mais alargado.

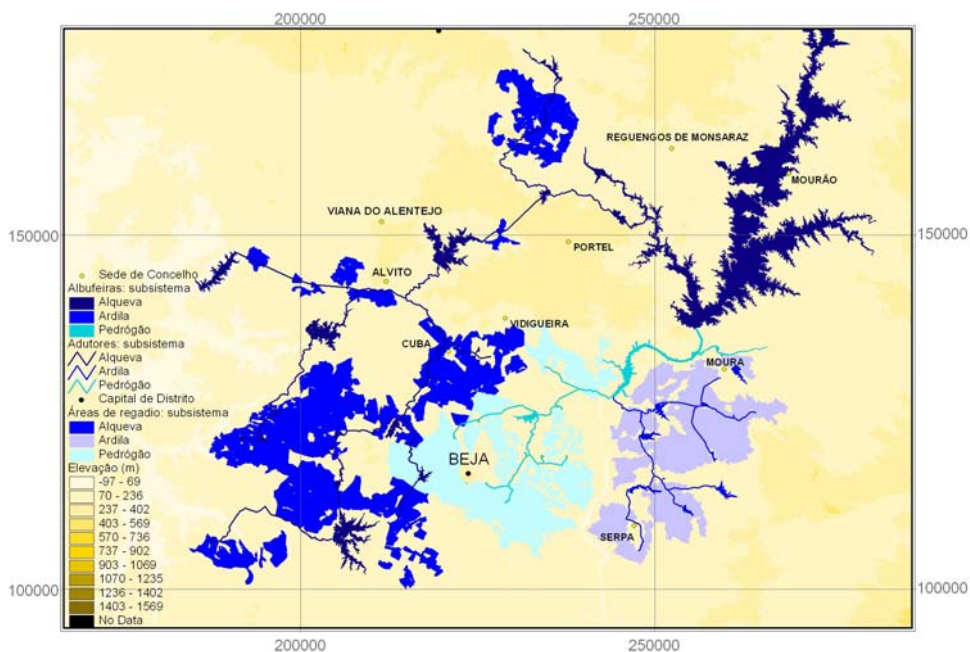


Figura 2 Empreendimento de Fins Múltiplos de Alqueva: áreas de regadio.

Os modelos das linhas de água principais compreendem os trechos do rio Guadiana na área de influência do EFMA e que não se incluem em albufeiras e trechos dos principais afluentes na referida área de influência que se revelem importantes quer em termos de caudais quer em termos de potenciais cargas poluentes transportadas.

3.2 Sistemas artificiais

As infra-estruturas de Alqueva, essencialmente compostas por um conjunto de albufeiras e respectivas ligações, estão organizadas em três subsistemas distintos: o subsistema de Alqueva, o subsistema de Pedrógão e o subsistema de Ardila (Figura 4).

Durante a fase inicial de desenvolvimento do SSD foi delimitada uma área de aplicação prioritária que compreende todas as infra-estruturas localizadas a montante da barragem de Alvito. A geometria destas infra-estruturas foi completamente caracterizada, tendo por base a informação definida nos projectos de execução das ligações e barragens. Essa informação foi devidamente organizada e incluída no sistema de informação integrante do SSD. Os elementos geométricos necessários a uma definição unívoca dos adutores foi tratada analiticamente de forma a conseguir-se consultar as suas características através de uma aplicação *Web*. Na Figura 5 apresentam-se os elementos geométricos em algumas das secções transversais e respectiva localização em planta.

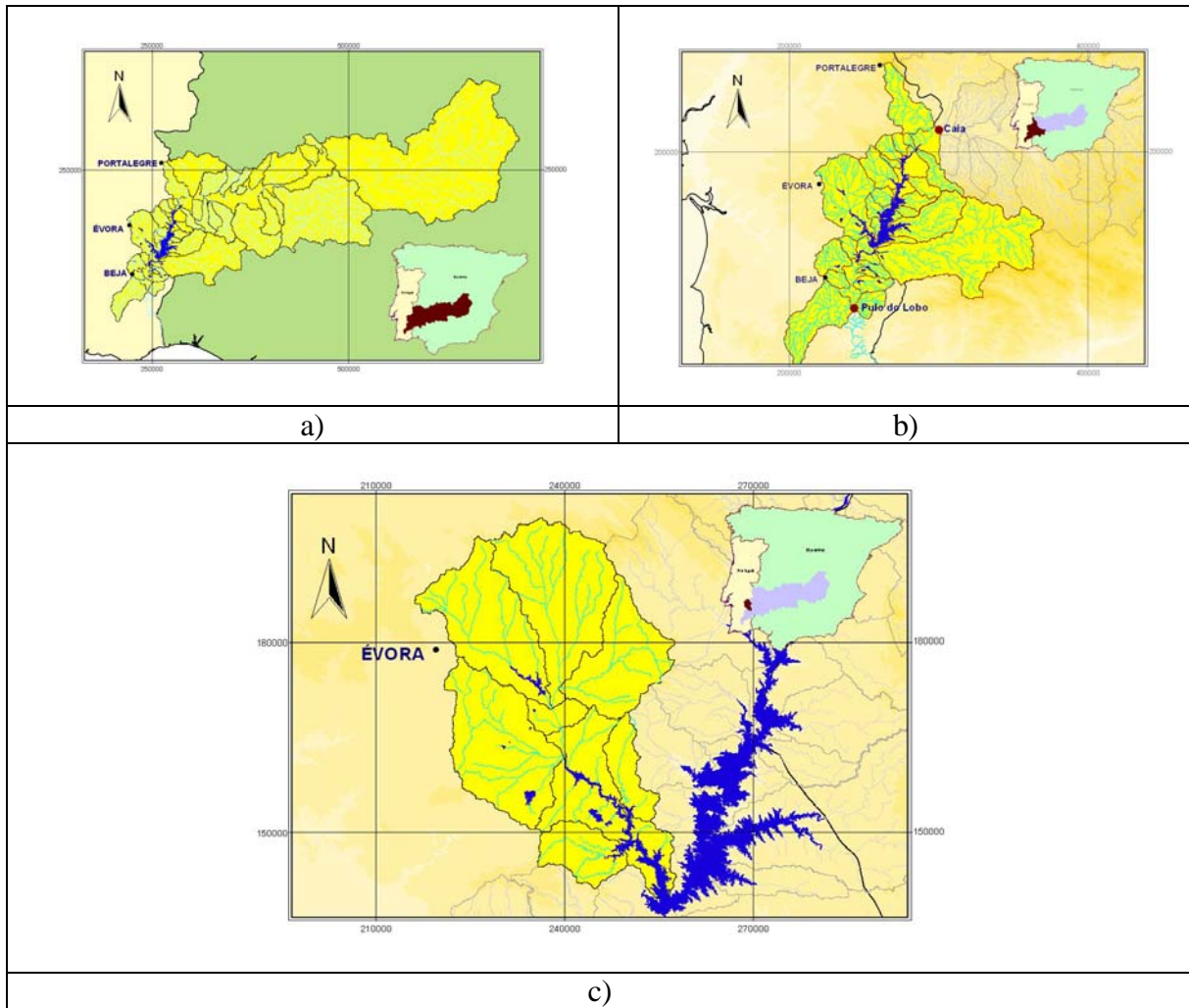


Figura 3 Sistemas naturais: modelos hidrológicos. a) sub-bacia do Guadiana na secção de Pulo do Lobo; b) sub-bacias entre a secção do Caia e Pulo do Lobo; c) sub-bacia do rio Degebe.

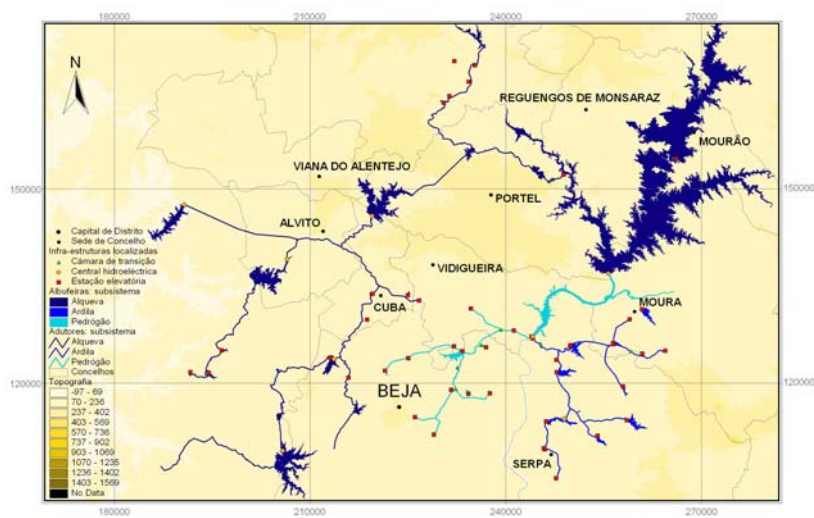


Figura 4 Empreendimento de Fins Múltiplos de Alqueva: divisão das infra-estruturas em três subsistemas.

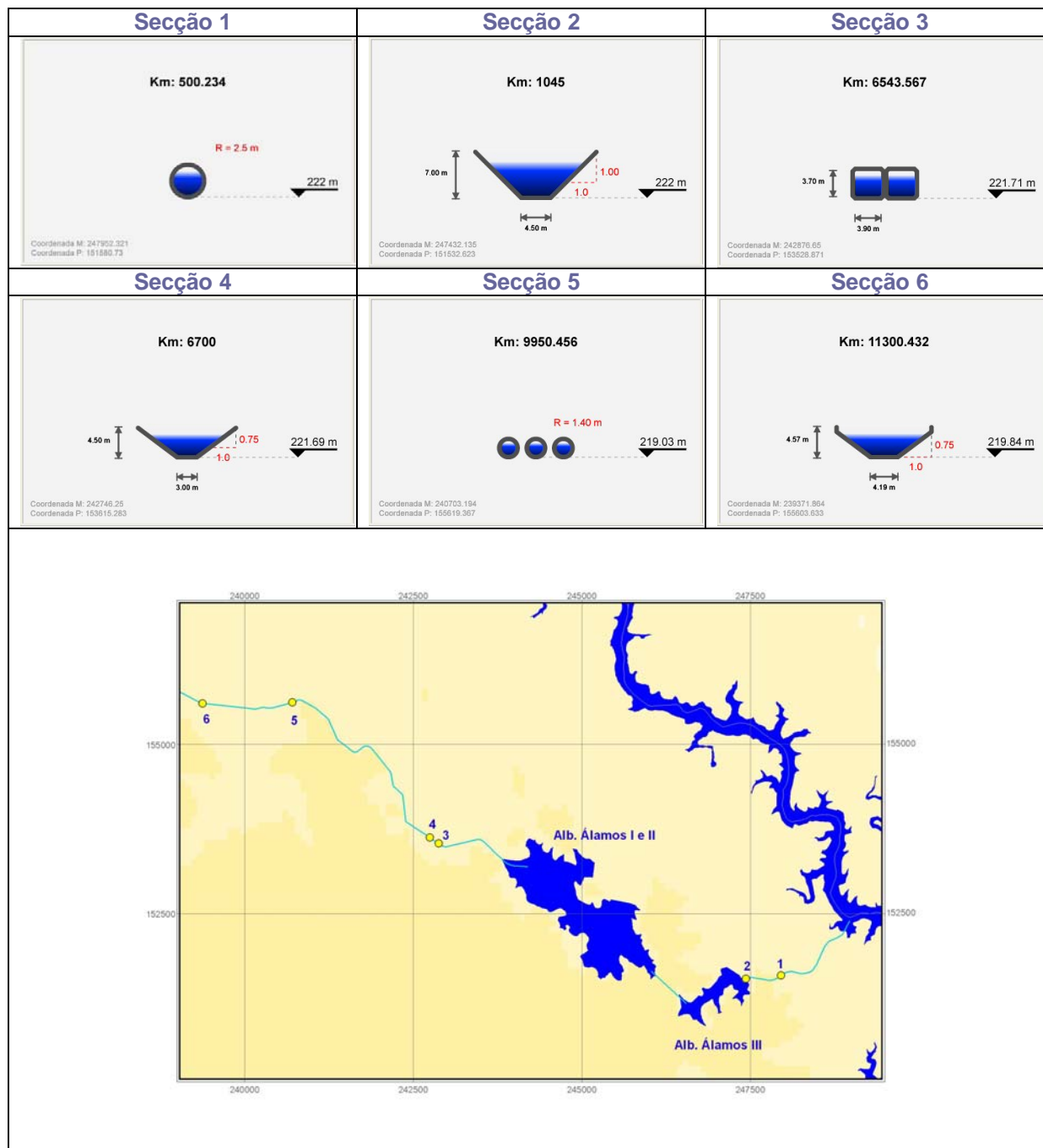


Figura 5 Geometria de algumas das secções transversais de adutores da rede primária visualizados através de uma aplicação Web.

4 DESCRIÇÃO GERAL DO PROGRAMA SOBEK

4.1 Aplicabilidade

O software SOBEK (WL, 2005) é aplicável a problemas de modelação hidrodinâmica e qualidade da água em rios, sendo constituído por sete módulos: hidrologia, hidrodinâmica em canais, hidrodinâmica em rios, redes de águas residuais, controlo em tempo real, qualidade da água e previsão de áreas inundáveis. O seu desenvolvimento integrado permite a simulação de problemas envolvendo

diferentes módulos em simultâneo. É baseado num método numérico bastante robusto que permite a obtenção de soluções mesmo para as simulações mais complexas.

4.2 Modelos numéricos

4.2.1 Modelo hidrológico de *Sacramento*

O módulo de hidrologia do *software SOBEK* é baseado no modelo de *Sacramento*. Este modelo permite calcular o escoamento instantâneo total, utilizando como dados de entrada a precipitação média na bacia e a evapotranspiração potencial.

O modelo de *Sacramento* divide o solo em duas camadas principais:

- a camada superior na qual ocorrem os processos rápidos junto à superfície do solo: evaporação, percolação, escoamento superficial e escoamento sub-superficial;
- a camada inferior em que ocorrem os processos lentos da região não saturada do solo: transpiração, recarga do aquífero e escoamento de base.

Em ambas as camadas são consideradas subzonas onde a água está sob efeito da tensão superficial (capilaridade) ou está sob efeito da pressão hidrostática (água livre). O mecanismo básico do modelo pode ser resumido do seguinte modo: a água é armazenada numa determinada porção da coluna do solo como água sob tensão superficial, até que a capacidade deste reservatório seja atingida. A partir daí, toda a água adicionada ao sistema será armazenada como água livre.

O volume de água sob tensão superficial só pode ser diminuído através de evaporação ou transpiração, enquanto que a água livre também sofre decaimento devido à percolação da camada superior para a camada inferior, escoamento sub-superficial, escoamento de base e recarga do aquífero.

O caudal instantâneo total é composto por fluxos provenientes de processos que ocorrem nas subzonas de água livre das camadas superior e inferior:

- escoamento directo: proveniente da chuva que cai sobre a fracção impermeabilizada da bacia, apresentando uma resposta hidrológica à escala de horas;
- escoamento superficial: proveniente da chuva quando a camada superior do solo estiver saturada, apresentando uma resposta hidrológica à escala de horas;
- escoamento sub-superficial: função do grau de saturação parcial da subzona de água livre da camada superior, apresentando uma resposta hidrológica à escala de dias;
- escoamento de base primário: proveniente da subzona de água livre primária da camada inferior, apresentando uma resposta hidrológica à escala de semanas ou meses;
- escoamento de base suplementar: proveniente da subzona de água livre suplementar da camada inferior, apresentando uma resposta hidrológica à escala de dias a semanas.

As principais componentes do sistema são apresentadas no esquema da Figura 6.

O modelo é composto por uma série de reservatórios com capacidades pré determinadas, interligados por processos que permitem a quantificação das condições de humidade do solo, as quais controlam a produção do escoamento fluvial. À medida que ocorrem eventos de precipitação estes reservatórios são preenchidos. O esvaziamento ocorre por percolação, evaporação ou drenagem lateral. Além disso, no modelo divide-se a área da bacia em regiões permeáveis e impermeáveis. A seguir apresenta-se uma descrição mais detalhada destas componentes.

À medida que se adiciona lentamente água a um solo, observa-se que a água adicionada é totalmente absorvida até um determinado limite, o qual depende das características e do tipo de solo. Geralmente, verifica-se que essa quantidade atinge valores da ordem de 15% do peso do solo. Nestas condições não existem moléculas de água livre. Este volume é denominado por água sob tensão

superficial e encontra-se tão fortemente ligado às partículas do solo que só pode ser removido através da evapotranspiração.

Quando a quantidade máxima de água sob tensão superficial num solo é atingida, todas as moléculas de água que lhe sejam adicionadas ficarão livres. A água que poderá ser adicionada ao solo e que não se encontra ligada às suas moléculas é denominada água livre. Estas duas componentes, água livre e água sobre tensão superficial, são os principais elementos do modelo de Sacramento.

Para se conseguir representar fisicamente o processo de escoamento considera-se o solo dividido em duas camadas: a inferior e a superior. Apesar do solo poder ser subdividido num número infinito de camadas, é considerado o número mínimo de camadas necessárias para representação física do sistema, com o objectivo de otimizar ou mesmo tornar possível a parametrização do modelo. As duas camadas possuem quer água livre quer água sobre tensão superficial, sendo definidos quatro reservatórios de armazenamento de água no solo distintos:

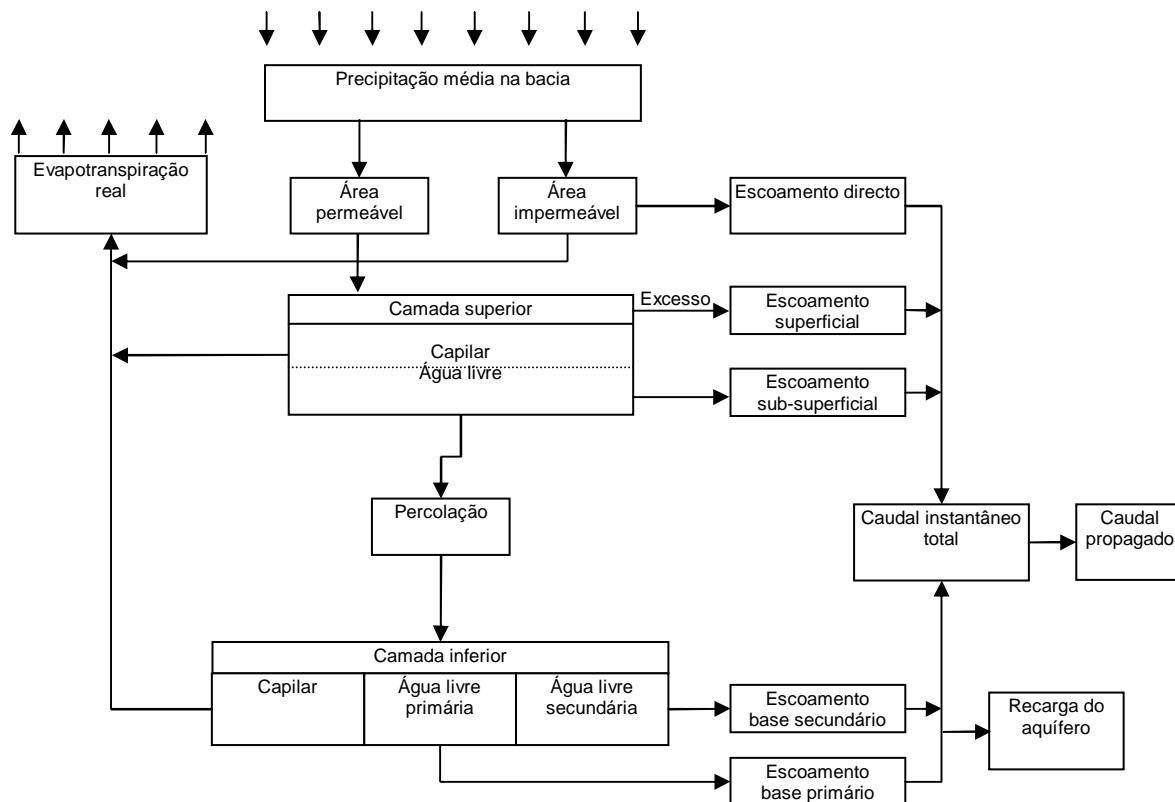


Figura 6 – Modelo de Sacramento: esquema conceptual.

4.2.2 Modelos hidrodinâmicos unidimensionais

A modelação do escoamento unidimensional é baseada nas equações de continuidade e de conservação da quantidade de movimento. Estas equações apresentam a seguinte forma:

$$\frac{\partial A_f}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q_{lat} \quad (1)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A_f} \right) + gA_f \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{gQ|Q|}{C^2 R A_f} - W_f \frac{\tau_{wi}}{\rho_w} = 0 \quad (2)$$

em que,

- Q , é o caudal [m^3/s]
- t , é o tempo [s]
- x , a coordenada unidimensional [m]
- A_f , é a área da secção molhada [m^2]
- g , a aceleração da gravidade [m/s^2]
- h , a altura do escoamento [m]
- C , é o coeficiente de Chézy [$m^{1/2}/s$]
- R , é o raio hidráulico [m]
- W_f , a largura superficial [m]
- q_{lat} , é o caudal lateral unitário [m^2/s]
- τ_{wi} , tensão tangencial devida ao vento [N/m^2]
- ρ_w , massa volúmica da água [kg/m^3]

Para além das equações anteriores são ainda utilizadas expressões adequadas ao cálculo das características de escoamento em estruturas como: pontes, passagens hidráulicas, sifões invertidos, orifícios, bombas, sifões e descarregadores. Nestas estruturas o escoamento depende dos níveis a montante e a jusante da estrutura, das suas dimensões e de um conjunto de parâmetros específicos de cada uma delas.

4.2.3 Modelos de qualidade da água unidimensionais

Os modelos de qualidade da água são baseados na equação de transporte unidimensional:

$$\frac{\partial(A_f C)}{\partial t} = -\frac{\partial(QC)}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(DA_f \frac{\partial C}{\partial x} \right) + SA_f \quad (3)$$

em que,

- C , é a concentração de constituinte [kg/m^3]
- D , é o coeficiente de dispersão turbulenta [m^2/s]
- S , é a fonte ou sumidouro devido a entradas no sistema e a produção/decaimento por reacções [$kg/m^3/s$].

O último termo da Eq. 3 refere-se às fontes de poluentes e à dependência em relação aos processos que ocorrem na coluna de água. A equação é resolvida numericamente pelo método dos volumes finitos e são consideradas tantas equações quantas as variáveis de qualidade da água consideradas na simulação.

4.3 Aplicação do SOBEK aos sistemas do EFMA

Os sistemas a modelar compreendem as sub-bacias hidrográficas, as albufeiras, os canais e principais linhas de água, como foi referido anteriormente. O *SOBEK* é aplicável a todos estes sistemas quer para simulações hidrodinâmicas quer para simulações da qualidade da água.

O programa *SOBEK* apresenta uma interface gráfica através da qual é possível realizar todas as tarefas de pré-processamento. A discretização espacial dos modelos é realizada nessa interface, utilizando como suporte a planta (em formato compatível com ferramentas de Sistemas de Informação Geográfica) das infra-estruturas. Como se tratam de modelos unidimensionais, são considerados nós em pontos em que existem estruturas hidráulicas, nas fronteiras e nos limites de trechos em que

ocorrem variações de secção transversal, tendo apenas que se respeitar o desenvolvimento dos canais. Para a sua localização recorreu-se aos elementos geométricos das infra-estruturas cuja organização foi anteriormente apresentada. Nesta primeira fase de construção, todos os elementos considerados no modelo são representados por objectos gráficos (nós e ligações entre nós). Assim, consideram-se as seguintes fases principais (Figura 7): preparação de mapa auxiliar à discretização espacial; criação de nós adequados à simulação das estruturas hidráulicas e fronteiras; estabelecimento das ligações inter-nodais; definição das secções transversais; e definição de vários conjuntos de dados relativos à simulação (duração, condições iniciais, parâmetros associados ao método numérico utilizado)

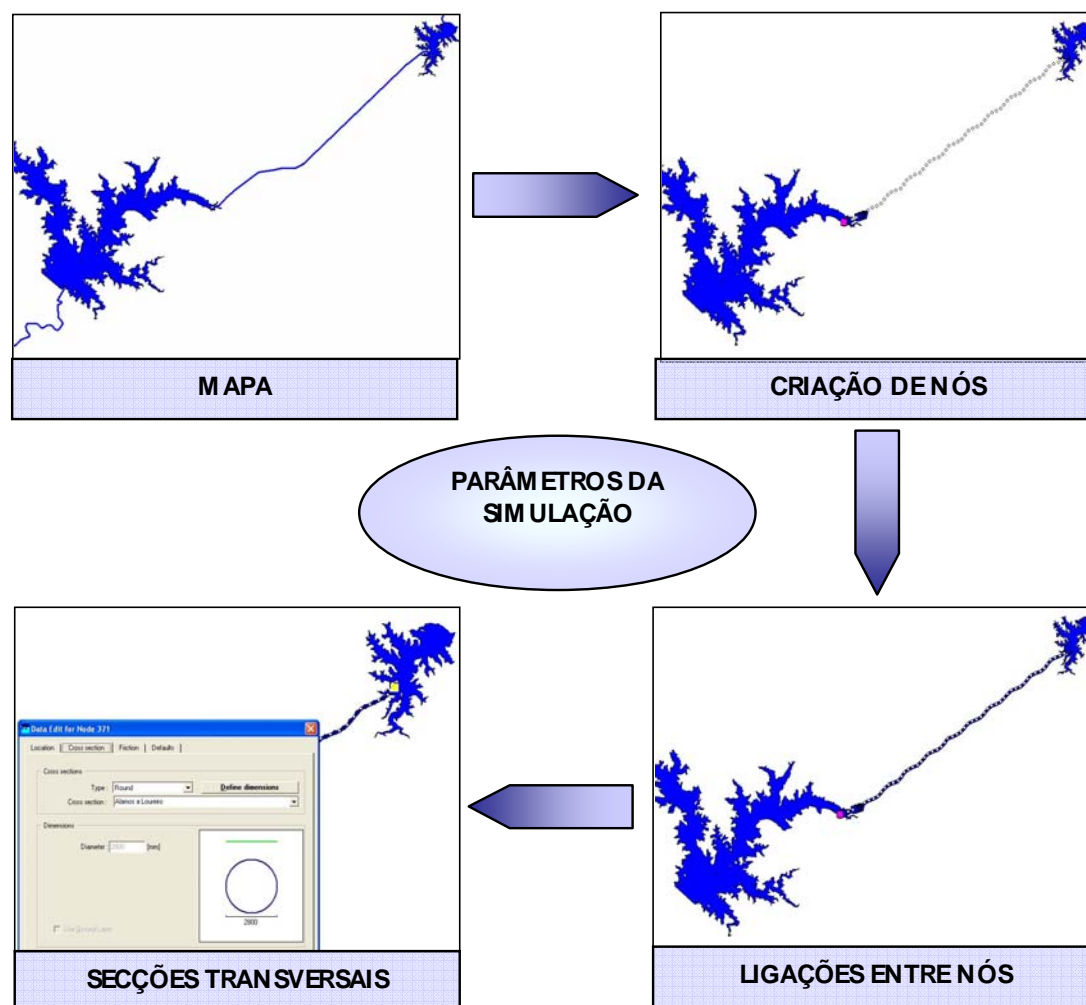


Figura 7 Principais fases de criação de modelos de adutores no programa *SOBEK*.

Os modelos criados são operados em ambiente *Web* através de interfaces especificamente desenvolvidas para o efeito. Os módulos de cálculo estão instalados no servidor *Web* e as interfaces permitem efectuar a edição de dados necessários à definição de diferentes simulações a realizar. Todos os resultados estão disponíveis para consulta através da interface *Web*.

A plataforma desenvolvida permite partilhar a utilização de um mesmo modelo e permite a sua execução remota. Nesta fase de desenvolvimento os valores dos parâmetros de calibração dos modelos são estabelecidos considerando o intervalo de valores utilizados em aplicações semelhantes. Quando os adutores entrarem em funcionamento serão obtidas as séries de dados necessárias a uma

calibração e validação dos modelos hidrodinâmicos e de qualidade da água em situação real de funcionamento.

5 RESULTADOS PRELIMINARES

Seguidamente apresentam-se alguns resultados de modelos criados com o programa *SOBEK* e aplicados na zona de estudo.

5.1 Sistemas naturais

Na Figura 8 apresenta-se o escoamento calculado para uma das sub-bacias do modelo hidrológico do rio Degebe durante um período de precipitação intensa.

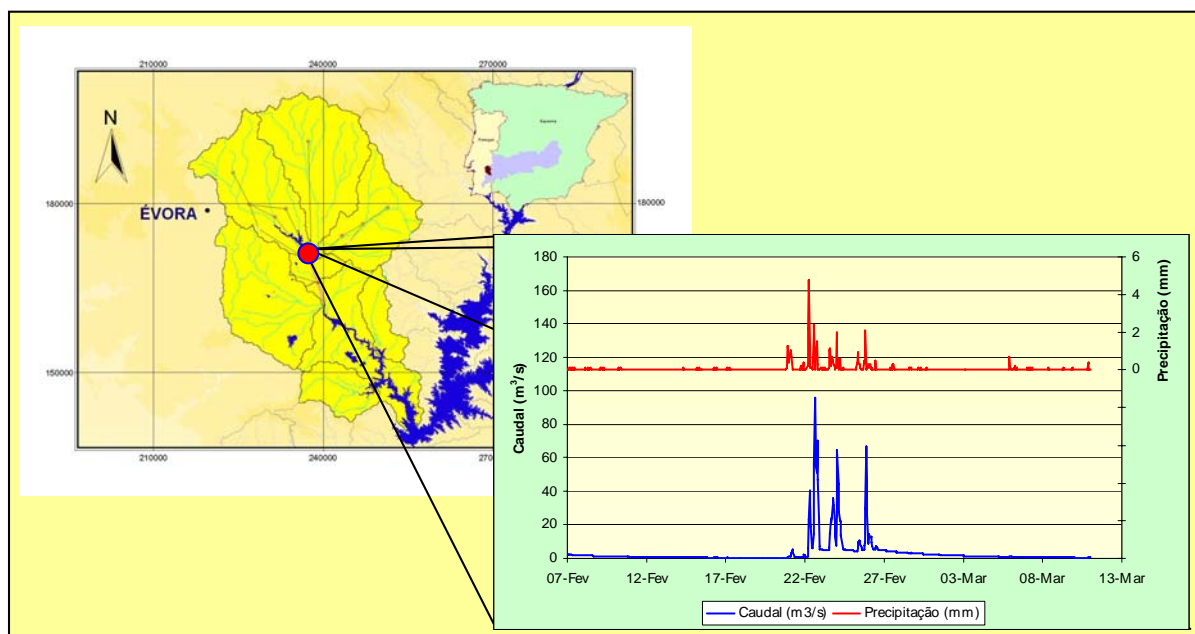


Figura 8 Modelo hidrológico do rio Degebe. Resultados da simulação para um período de precipitação intensa na secção de Monte Novo.

5.2 Sistemas artificiais

Nas Figuras 9 e 10 apresentam-se resultados de uma simulação hidrodinâmica relativa à ligação entre as albufeiras de Loureiro e de Alvito. A tomada de água na albufeira de Loureiro é controlada por uma comporta que é considerada no modelo hidrodinâmico. A simulação apresentada corresponde a uma abertura total da comporta (em 5 minutos) seguida de variação da abertura, de acordo com uma lei representada na Figura 10. Os níveis das albufeiras são considerados constantes durante o período da simulação.

Os resultados correspondem à representação, em perfil, das alturas de água naquela ligação para diferentes instantes (Figura 9). Estes resultados foram processados pelo módulo de visualização de resultados em canais e linhas de água em ambiente *Web*. Este módulo de visualização gráfica permite ainda efectuar animações (de soluções dinâmicas) e é complementado por módulos de apresentação tabular e por um módulo de apresentação de resultados em gráficos.

Na Figura 10 apresentam-se os resultados para o caudal escoado sob a comporta e à elevação da superfície livre a jusante daquela estrutura.

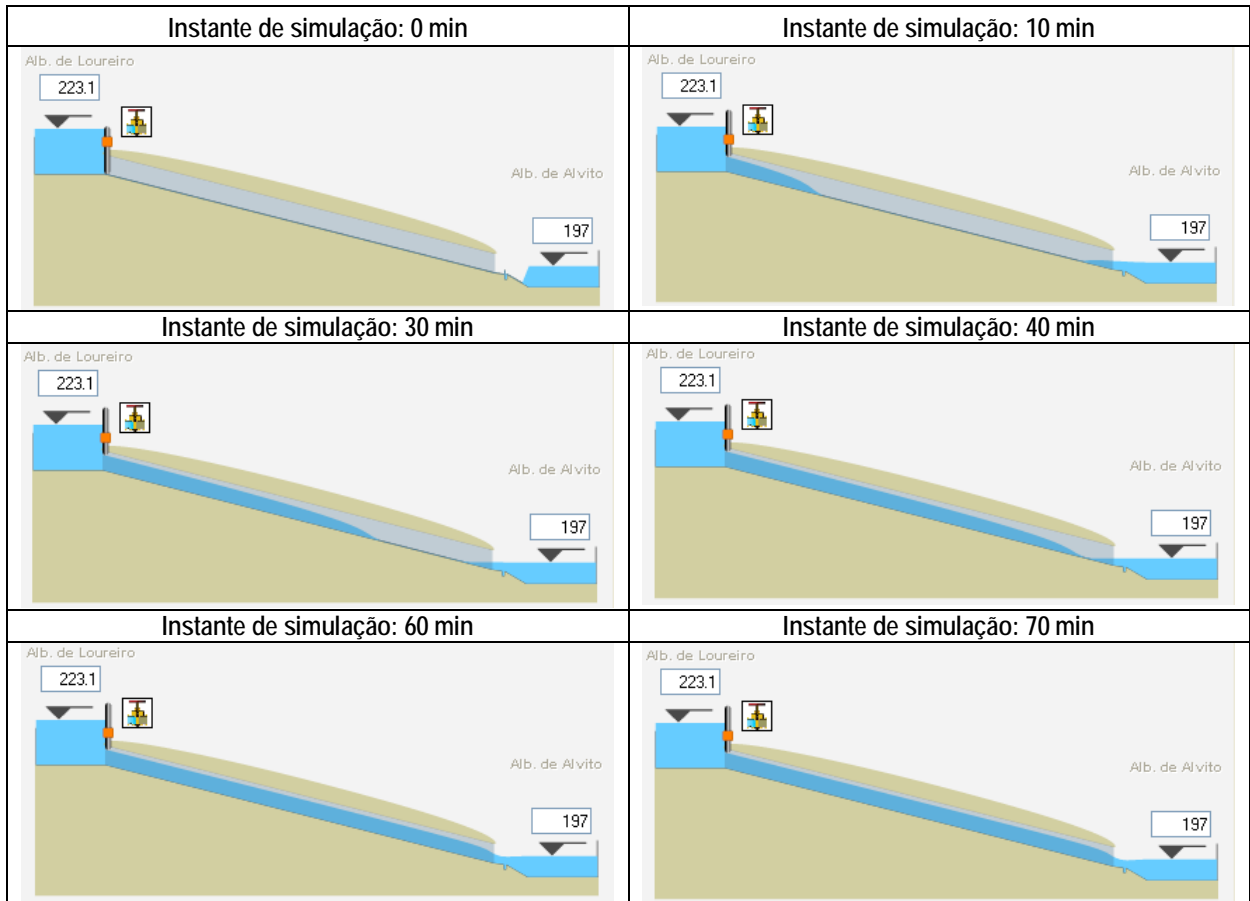


Figura 9 Modelo hidrodinâmico da ligação Loureiro – Alvito. Simulação da abertura da comporta.

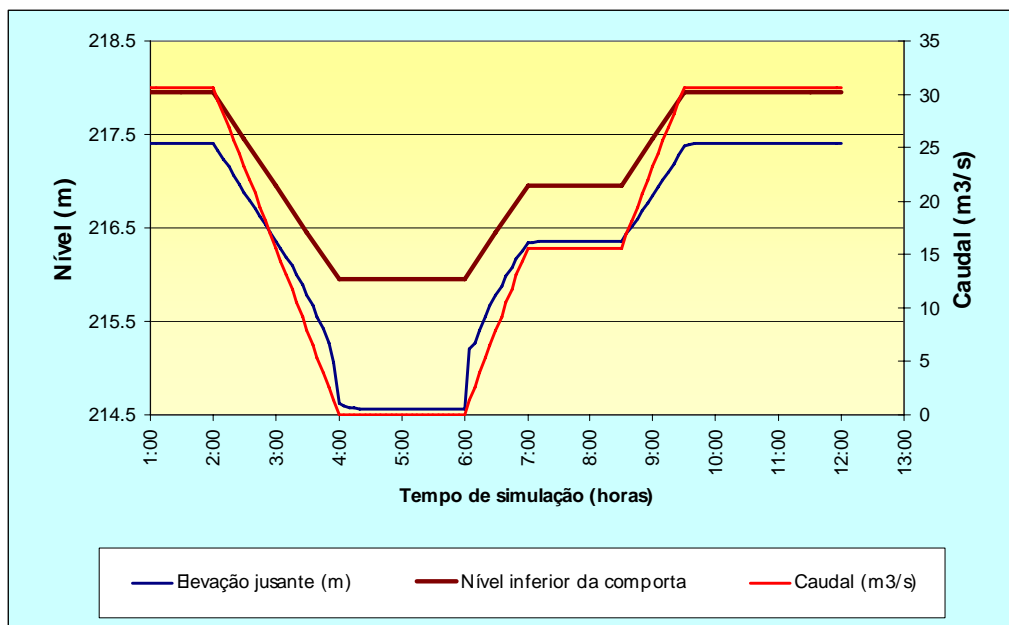


Figura 10 Modelo hidrodinâmico da ligação Loureiro – Alvito. Simulação da abertura da comporta: Caudal escoado sob a comporta e nível da água imediatamente a jusante.

6 CONCLUSÃO

O presente trabalho reporta a situação actual de desenvolvimento de aplicações com o *software SOBEK*, na modelação dos sistemas naturais e artificiais do EFMA, enquadrada no sistema de suporte à decisão *ODeAnA*. Este *software* revela-se adequado à simulação dos escoamentos nos canais das infra-estruturas de Alqueva e a sua inclusão no ambiente *Web* construído encontra-se numa fase de finalização.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à EDIA o apoio financeiro concedido para a realização deste estudo.

BIBLIOGRAFIA

EDIA (2002) "Programa de Monitorização da Qualidade da Água. Enchimento das Albufeiras de Alqueva e Pedrógão. Relatório Final". Abril de 2002, EDIA, Beja, Portugal, 207 pp.

UE (2000) – "*Directiva 2000/60/CE do Parlamento Europeu e do Conselho, de 23 de Outubro de 2000, que estabelece um Quadro de Acção Comunitária no Domínio da Política da Água*", *Jornal Oficial das Comunidades Europeias*, **L327**, 22.12.2000, pp. 1-73,
http://europa.eu.int/comm/environment/water/water-framework/index_en.html.

VIEIRA, J.M.P., PINHO, J.L.S. (2002) "Decision Support Systems for Water Resources Management in Coastal Zones", in 3rd World Congress of the International Water Association (IWA), Melbourne, Australia.

WL (2005) "SOBEK – Reference Manual". Delft Hydraulics, Netherlands.