



ASSOCIAÇÃO PORTUGUESA DOS RECURSOS HÍDRICOS



ABES ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE
ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL

9

I SIMPÓSIO LUSO-BRASILEIRO DE
ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL

SISTEMAS DE PRODUÇÃO E DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA

SIMULAÇÃO DE SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA:
SITUAÇÃO ACTUAL E PERSPECTIVAS PARA PORTUGAL

EDUARDO RIBEIRO DE SOUSA

Doutor em Eng^a Civil. Prof. do IST. Consultor da Hidrosistemas,
Estudos Especiais de Sistemas Hídricos e Ambientais, Lda., Lisboa, Portugal

RESUMO

A necessidade cada vez maior de racionalizar os investimentos, de reduzir os encargos de exploração, em particular a componente do consumo de energia, e de otimizar as metodologias de controle de sistemas de distribuição de água tem conduzido, principalmente nos Estados Unidos e em diversos países da Europa, ao desenvolvimento de novas técnicas de análise destes sistemas através do recurso a modelos computacionais.

A presente comunicação, que compreende cinco capítulos e um apêndice, inicia-se por uma apresentação do enquadramento do problema da simulação de sistemas deste tipo. Segue-se uma descrição sumária do estado actual dos conhecimentos no âmbito das técnicas numéricas na modelação dos sistemas. Nos dois capítulos seguintes refere-se a experiência adquirida e em curso em Portugal descrevem-se as potencialidades postas à disposição pelo autor. Finalmente, no último capítulo apresentam-se e discutem-se os benefícios práticos para a gestão autárquica decorrentes da aplicação das técnicas de simulação de sistemas de distribuição de água. No apêndice descrevem-se, mais pormenorizadamente, os modelos computacionais presentemente disponíveis em Portugal e em complemento ao apresentado no quarto capítulo.

1. ENQUADRAMENTO DO PROBLEMA

A necessidade cada vez maior de racionalizar os investimentos, de reduzir os encargos de exploração, em particular a componente do consumo de energia, e de otimizar as metodologias de controle de sistemas de distribuição de água tem conduzido, nos Estados Unidos e em diversos países da Europa, ao desenvolvimento de novas técnicas de análise destes sistemas através do recurso a modelos computacionais.

De acordo com o desenvolvimento da tecnologia actual, podem ser identificados três níveis de aplicação dos modelos computacionais a sistemas de distribuição de água: análise do equilíbrio hidráulico, simulação dinâmica e gestão em tempo real.

No primeiro nível, muitas vezes designado inadequadamente por simulação, o sistema de distribuição, representado pelo modelo, considera-se resolvido para um conjunto de consumos nos nós e para umas dadas condições de fronteira, quando são conhecidas as pressões nos nós e os caudais em todas as tubagens e estações elevatórias do sistema. Esta solução apenas descreve as condições de funcionamento do sistema para um dado instante.

No segundo nível de aplicação, simulação dinâmica, a modelação do sistema de distribuição consiste na obtenção de uma sequência de soluções de equilíbrio hidráulico para vários instantes ao longo do período de simulação, ligadas entre si por um esquema de integração no tempo, através das leis de variação do armazenamento nos reservatórios e das leis de variação de consumo nos nós. Em modelos computacionais deste tipo a sua estruturação centra-se em programas do tipo anterior, os quais fornecem as condições de equilíbrio hidráulico num dado instante. Cada uma das soluções de equilíbrio hidráulico utiliza os valores finais obtidos no instante anterior como ponto de partida para a análise do instante subsequente.

Uma das características importantes destes modelos computacionais é o poderem incluir lógicas de controle, as quais representam regras de exploração do sistema. Por exemplo, as estações elevatórias e sobressessoras podem ser ligadas ou desligadas, ou válvulas de diversos tipos podem ser abertas ou fechadas, em função das variações de consumo, de pressão ou de nível de água nos reservatórios. Após cada solução de equilíbrio hidráulico o modelo analisa a regra de exploração definida e modifica os dados de base de acordo com as novas condições de funcionamento.

O modelo permite ainda conhecer valores acumulados e resultados síntese, tais como os volumes bombados e respectivos consumos de energia ao longo do período de simulação, o número de vezes que as diferentes estações elevatórias ou sobressessoras foram ligadas ou desligadas, os balanços de níveis e de volumes de água nos reservatórios, as pressões máximas e mínimas verificadas ao longo do dia em nós previamente seleccionados e para todo o sistema, etc..

O controle automático, local ou centralizado, tem constituído uma componente importante de uma parte dos sistemas de distribuição de água. Mesmo os sistemas de pequena dimensão englobam, com maior ou menor grau de sofisticação, equipamento de controle e de monitorização local de estações elevatórias e válvulas e para a medição e registo de níveis, pressões e caudais. São utilizados localmente esquemas de controle automático que compreendem relés e elementos analógicos de controle para o controle de bombas, reservatórios, etc.. Nos sistemas de média e grande dimensão, as medições e os sinais de controle são transmitidos entre os vários pontos do sistema a uma estação central de controle e monitorização. Nesta estação central ou de "despacho", as medições contínuas, como por

exemplo os caudais bombados, são registadas em papel ou em instrumentos indicadores, enquanto as indicações de alarme e outras são feitas através de indicadores luminosos, interruptores ou botões de controle. Nestas centrais de "despacho" o equipamento de controle, de aviso, de medição e de registo encontra-se agrupado num quadro sinóptico, no qual se representa uma esquematização gráfica do sistema de distribuição.

Embora o esquema anterior constitua um avanço significativo quando correctamente instalado, ele não permite por si só garantir que a exploração do sistema de distribuição seja feita dentro dos níveis de segurança desejados e de uma forma otimizada. O terceiro nível de aplicação dos computadores na engenharia dos sistemas de distribuição de água destina-se a cobrir as lacunas apontadas, tendo presente que as exigências dos consumidores são cada vez maiores, assim como os custos decorrentes da exploração do sistema, na qual não pode ser ignorada a componente do consumo de energia. Os benefícios potenciais da aplicação da gestão em tempo real pela introdução de computadores que controlem e optimizem a exploração do sistema ultrapassam significativamente os custos envolvidos. Os benefícios podem incluir a redução dos custos de energia, o melhor aproveitamento do pessoal técnico ligado à exploração, o conhecimento dos consumos anteriores e a melhoria dos programas de formação dos operadores do sistema.

A gestão em tempo real pode ser implementada das formas mais diversas e a vários níveis de complexidade dependendo das características específicas de cada sistema e dos recursos financeiros disponíveis das entidades gestoras. Existem dois tipos de controle habituais: circuito aberto ou fechado.

O sistema mais simples do primeiro tipo utiliza um computador para registar a informação recolhida (por telemedida), fornecer um relatório digital ou gráfico do estado de funcionamento do sistema ao operador e processar os comandos para actuação remota dos equipamentos de controle do sistema (por telecontrole). A um outro nível, a estrutura de controle pode incorporar ainda, no computador, um conjunto de recomendações de estratégia de exploração, à qual o operador recorrerá para definição de procedimentos a adoptar. Finalmente, o nível mais avançado de controle do sistema em circuito aberto permite obter do computador uma previsão dos consumos em intervalos de tempo subsequentes, o que torna possível ao operador simular estratégias de controle alternativas. Por utilização dos resultados do computador obtidos de cada simulação, o operador escolherá a estratégia a seguir na exploração no intervalo de tempo seguinte.

No controle do sistema em circuito fechado, o computador fornece estimativas de consumos, dentro de um procedimento pré-definido, considerando, ainda, o estado de funcionamento e as restrições do sistema de distribuição e a componente de custos de forma a que automaticamente seja seleccionada e posta em execução a estratégia óptima de controle. No entanto, é sempre salvaguardada a eventual intervenção do operador. A gestão em tempo real exige modelos de simulação dinâmica, para além de outros respeitantes a processamento de dados e estimativas de consumos (na terminologia inglesa "demand forecasts").

2. TÉCNICAS NUMÉRICAS NA MODELAÇÃO: ESTADO ACTUAL DOS CONHECIMENTOS

O estabelecimento das condições de equilíbrio hidráulico de sistemas de distribuição de água é baseado nas duas leis fundamentais da mecânica dos fluídos, a da continuidade e a da conservação da energia, e numa relação entre o caudal e a perda de carga, definida através das equações de Darcy-Weisbach (associada à equação implícita de Colebrook-White), Manning-Strickler ou Hazen-Williams.

De acordo com o estado actual dos conhecimentos o problema pode ser equacionado por três vias alternativas: equações dos troços, que consiste em escrever as

equações da continuidade e da conservação da energia em termos do caudal em cada tubagem; equações dos nós, que consiste em escrever apenas as equações de continuidade em termos das cotas piezométricas nos nós de junção; equações das malhas, que consiste em escrever as equações de conservação da energia em termos das correcções de caudais em cada malha do sistema. Qualquer das vias apresentadas exige a resolução de um sistema de equações não-lineares (sendo as incógnitas os caudais nos troços, as cotas piezométricas nos nós ou as correcções de caudais nas malhas), pelo que se torna necessário utilizar técnicas numéricas adequadas para a obtenção da solução. Para além disso, surgem aspectos específicos quando se pretendem introduzir estações elevatórias, sobressororas, válvulas redutora de pressão e outros elementos especiais. A apresentação detalhada destes aspectos sai fora do âmbito da presente comunicação, remetendo-se o leitor para a consulta de RIBEIRO DE SOUSA 1984a e RIBEIRO DE SOUSA 1984 b.

No que respeita aos métodos numéricos, o mais antigo é, sem dúvida, o de Hardy Cross (HARDY CROSS 1936) e o de maior divulgação para o cálculo das condições de equilíbrio hidráulico, fazendo parte das matérias versadas na maioria dos livros de texto de hidráulica e de mecânica dos fluídos. Este método é um procedimento iterativo por aplicação do método de Newton no qual, em cada iteração, é resolvida uma equação de cada vez, antes de prosseguir para a seguinte, em vez de resolver o sistema de equações simultaneamente.

Antes do advento dos computadores foi praticamente o único método utilizado, embora ainda hoje muitos dos modelos computacionais disponíveis sejam baseados neste método. No entanto, com as potencialidades cada vez maiores dos computadores, por um lado, e com a maior complexidade dos sistemas a estudar, por outro, o método de Hardy Cross tem-se revelado de lenta convergência e até com enormes riscos de divergência, apesar das melhorias significativas introduzidas por diversos investigadores. A tendência natural tem sido a do seu abandono em favor de métodos mais recentes, sofisticados e numericamente mais eficientes baseados na resolução simultânea do sistema de equações, dos quais se destacam o de Newton-Raphson (SHAMIR e HOWARD, 1968) e o da teoria linear (WOOD e CHARLES 1972).

Atingido um grande nível de sofisticação dos modelos de equilíbrio hidráulico, que como se referiu apenas descrevem as condições de funcionamento do sistema para um dado instante, assistiu-se a um enorme avanço científico, desde há cerca de uma década, no sentido de dotar os modelos com capacidade de simular dinamicamente os sistemas. Estes modelos, que constituem instrumentos muito valiosos para apoio à exploração dos sistemas, centram-se nos modelos anteriores e, como se referiu, não são mais do que a obtenção de sucessivas soluções de equilíbrio hidráulico ligadas entre si por um esquema de integração no tempo.

3. EXPERIÊNCIA ADQUIRIDA E EM CURSO EM PORTUGAL

Apesar do enorme avanço técnico e científico a que se vem assistindo nos últimos quinze anos na área da engenharia da modelação matemática de sistemas de distribuição de água, a aplicação desta tecnologia em Portugal só muito recentemente (cerca de 3 a 4 anos) começou a ter algum incremento. Analisar os motivos que levaram a este rumo dos acontecimentos é tema complexo e que não constitui objectivo da presente comunicação. Antes sim, interessa divulgar o que já foi e está a ser realizado e o âmbito em que essa actuação se insere, perspectivando para o futuro as potencialidades em termos de tecnologia nacional. Estes aspectos serão abordados neste capítulo e nos restantes. Evidentemente que o que será apresentado circunscrever-se-á fundamentalmente à experiência do autor.

Para efeitos de apresentação da experiência adquirida e em curso neste domínio serão considerados três níveis: ensino universitário (licenciatura e pós-gradua-

ção), investigação e aplicações práticas.

Ao nível universitário, estas matérias são ministradas, já há alguns anos, na cadeira de Saneamento Básico I do curso de licenciatura em Engenharia Civil no Instituto Superior Técnico da Universidade Técnica de Lisboa. Nesta mesma instituição universitária e no âmbito do Curso de Mestrado em Hidráulica e Recursos Hídricos é ministrada uma cadeira neste domínio, introduzida pela primeira vez em Portugal ao nível da pós-graduação.

Ao nível da investigação tem vindo a ser desenvolvido, desde 1981, um programa de investigação conjunto entre o Instituto Superior Técnico (Departamento de Engenharia Civil) e o Laboratório Nacional de Engenharia Civil (Departamento de Hidráulica) ao abrigo do convénio existente entre aquelas duas instituições. No âmbito deste projecto o autor orientou a implementação e a adaptação de um modelo computacional de equilíbrio hidráulico e foi orientador científico na elaboração de uma tese para a obtenção do grau de especialista do LNEC, no âmbito da qual foram desenvolvidos modelos de optimização do dimensionamento de sistemas de distribuição de água.

Finalmente, ao nível de aplicações práticas, em que o autor participa, citam-se os exemplos da análise do equilíbrio hidráulico da rede de distribuição de água à cidade de Almada e o desenvolvimento e implementação de modelos computacionais de apoio ao planeamento e exploração dos sistemas de abastecimento de água aos concelhos de Cascais e Sintra. Enquanto que o primeiro estudo englobou apenas uma análise do equilíbrio hidráulico da rede de abastecimento, os dois restantes incluem, ainda, a aplicação de modelos de simulação dinâmica a todo o sistema, englobando a calibração dos mesmos. O estudo relativo ao modelo do sistema de abastecimento de água ao concelho de Cascais é objecto de uma outra comunicação deste Simpósio (RIBEIRO DE SOUSA e COSTA 1984).

4. POTENCIALIDADES DISPONÍVEIS EM PORTUGAL

Do exposto no parágrafo anterior pode concluir-se que a aplicação de modelos computacionais no âmbito da modelação de sistemas de distribuição de água, principalmente no domínio da simulação dinâmica, só muito recentemente começou a ter maior incremento.

No entanto, ao longo da actividade de investigação e dos trabalhos desenvolvidos ou em curso, o autor tem vindo a adquirir experiência neste domínio através da utilização de diversos modelos computacionais com graus de sofisticação variáveis que cobrem campos de aplicação desde o equilíbrio hidráulico até à simulação dinâmica completa dos sistemas.

Neste parágrafo descrevem-se as potencialidades e as características dos principais modelos utilizados e dos quais se destacam os com a designação REDMAR/HS, SIMRED/HS e SIDINA/HS⁽¹⁾, cuja síntese comparativa se apresenta no Quadro 1, remetendo-se para o Apêndice I uma descrição mais detalhada dos mesmos. O primeiro destina-se apenas à análise do equilíbrio hidráulico englobando os dois restantes modelos potencialidades, para além disso, de simulação dinâmica. Em complemento o modelo SIDINA/HS apresenta capacidades de dimensionamento, de análise de custos e gráficas.

Qualquer dos programas referidos está orientado para a análise de sistemas de distribuição de água complexos e de grandes dimensões e inserem técnicas numéri-

(1) - Modelos implementados e adaptados a partir dos algoritmos de Epp e Fowler, Ronald Jeppson e Don Wood.

QUADRO 1 - SINTESE COMPARATIVA DAS CARACTERÍSTICAS DOS PROGRAMAS
 REDMAR/HS, SIMRED/HS E SIDINA/HS

	REDMAR/HS(1)	SIMRED/HS	SIDINA/HS
• Entrada de dados	Formatada	Formatada	Formato livre
• Verificação dos dados de entrada	Sim	Sim (inc. dupla verificação)	Sim (inc. dupla verificação)
• Elementos especiais	<ul style="list-style-type: none"> - E. elevatórias e sobrepress. - Reservatórios - P. de carga localizadas - Válvulas redutoras de pressão e retenção 	<ul style="list-style-type: none"> - Idem do anterior - Válvulas reguladoras de caudal a montante - Tubagens seccionadas 	<ul style="list-style-type: none"> - Idem do anterior - Válvulas de pressão constante a montante - Orifícios - Dispositivos de pressão diferencial
• Cálculo das perdas de carga localizadas	<ul style="list-style-type: none"> - Manning-Strickler - Hazen-Williams 	<ul style="list-style-type: none"> - Hazen-Williams - Darcy-Weisbach 	<ul style="list-style-type: none"> - Manning-Strickler - Hazen-Williams - Darcy-Weisbach
• Equilíbrio hidráulico	Sim	Sim	Sim
• Simulação dinâmica	NÃO	Sim	Sim (mais completa)
• Dimensionamento	NÃO	NÃO	Sim(2)

QUADRO 1
(Cont.)

	KEDRAR/IS	SINKED/HS	SIDINA/HS
• Análise de custos	Não	Não	Sim (capital fixo + exploração)
• Análise subsequente	Não	Sim	Sim (mais completa)
• Capacidades gráficas	Limitadas	Não	Sim
• Inicialização de curvais e geração automática das malhas	Sim	Sim	Sim
• E. cievatórias e sobre-pressoras			
- Curvas característ.	Coef. polinômio 2º ou 3º grau	3 pontos (H,Q) ou potência útil	3 ou + pontos (H,Q) ou pot. útil
- Paralelo ou série	Sim	Não	Sim
• Métodos numéricos	Newton-Raphson (eqs das malhas) Factorização de Cholesky	Teoria linear (eqs dos troços) Técnicas de matrizes esparsas	Newton-Raphson (eqs das malhas) Factorização de Cholesky Eficiente método de eliminação Técnicas de matrizes esparsas
• Utilização em minicomputadores	Sim	Sim	Provável e/limitações de capac.

(1) - Idêntico ao modelo SIMAL 1 (LINEC), cuja versão original foi cedida pelo Instituto Superior Técnico ao LNEC.

(2) - Mais avançado do que o modelo SIMAL 2 (LINEC) (MELO BAPTISTA, RIBEIRO DE SOUSA E ALEGRE 1983).

cas muito avançadas que lhes conferem grande rapidez de execução (quanto muito da ordem de alguns minutos) e memórias de computador relativamente modestas (200 a 300 Kb para sistemas até 500 troços). Estas características tornam viável a sua utilização em minicomputadores, tendo o autor experiência neste campo relativamente aos modelos REDMAR/HS e SIMRED/HS.

5. BENEFÍCIOS PRÁTICOS PARA A GESTÃO AUTÁRQUICA DA APLICAÇÃO DA SIMULAÇÃO DE SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA

A aplicação de modelos computacionais no âmbito da gestão de sistemas de distribuição de água abrange os campos do planeamento e da exploração dos sistemas. Os benefícios práticos da aplicação destas técnicas para os responsáveis pela gestão de sistemas de distribuição de água, ao nível das autarquias, podem agrupar-se nas categorias que a seguir se discutem:

Gestão de dados de base: A aplicação de modelos exige a recolha e a categorização de uma quantidade significativa de dados de base relativos às componentes e às condições de funcionamento dos sistemas. Surpreendentemente, para grande parte dos sistemas de distribuição de água em Portugal, não existe um adequado banco de dados, pelo que o simples facto de se desenvolver um modelo computacional permitirá rever e melhorar os procedimentos de recolha e registo desses mesmos dados. É frequente, salvo algumas excepções, não existirem mapas de cadastro actualizados dos sistemas e os dados de consumos se destinarem apenas a fins administrativos.

Avaliação dos efeitos das flutuações de consumo: O consumo de água num dado sistema apresenta flutuações diurnas e sazonais devidas, em geral, às características demográficas e geográficas específicas dos aglomerados populacionais. Os efeitos destas flutuações de consumo no funcionamento do sistema podem ser avaliados de uma forma sistemática, eficaz e num curto espaço de tempo através da utilização de modelos computacionais de simulação dinâmica. Dentro deste aspecto são de salientar, por exemplo, as variações de pressão e de caudal na rede de distribuição e as flutuações dos níveis de água nos reservatórios; neste último caso, é possível obter dados para determinar as reais necessidades de armazenamento no sistema, com vista ao seu adequado funcionamento.

Simulação de situações de emergência: Um outro benefício dos modelos computacionais é a capacidade que eles apresentam em avaliar o funcionamento do sistema perante situações de emergência, tais como a ocorrência de um incêndio, a rotura de condutas, a saída fora de serviço de estações elevatórias ou a existência de consumos industriais inesperados. Variações sistemáticas da localização destas situações de emergência permitirão, para um dado sistema, concluir dos "pontos fracos" do mesmo.

Avaliação dos efeitos de novos consumos: É frequente colocarem-se problemas aos responsáveis pela gestão de sistemas de distribuição de água sobre os efeitos que o licenciamento de uma nova unidade industrial ou urbanização tem no funcionamento do sistema. Em certos casos, torna-se necessário proceder à remodelação local das condutas de distribuição de forma a assegurar a esses novos consumidores o caudal necessário com a adequada pressão. As respostas a estes problemas podem ser obtidas de uma forma eficaz e num curto espaço de tempo através da utilização de modelos computacionais de equilíbrio hidráulico.

Optimização da exploração do sistema: Os aumentos dos custos da energia, dos materiais e dos encargos com o pessoal exigem, cada vez mais, que se proceda à exploração otimizada dos sistemas. A simulação dos sistemas através de modelos computacionais de simulação dinâmica constituem instrumentos fundamentais de avaliação das variações diurnas das necessidades de água, da operação das

estações elevatórias e das flutuações dos níveis de água nos reservatórios. Os resultados de tais simulações são úteis para a definição das regras de exploração de estações elevatórias, das pressões em válvulas redutoras de pressão e das taxas de produção de água, com vista à minimização dos custos de exploração e ao aumento da eficácia hidráulica do sistema. De igual modo, a simulação dinâmica das variações dos níveis de água nos reservatórios permite avaliar a possibilidade de reduzir as quantidades de água produzidas e os caudais bombados.

Planeamento a médio e longo prazo: A análise do funcionamento do sistema em função das necessidades de água a médio e longo prazo constitui um aspecto de extrema importância para os responsáveis pelo planeamento da expansão de capacidade dos sistemas de distribuição de água. A simulação, através de modelos computacionais, para as condições futuras permite ao responsável pelo planeamento avaliar, com eficácia, as exigências de ampliação ou remodelação do sistema através do aumento da capacidade de armazenamento, do reforço de condutas adutoras e de distribuição e da ampliação da capacidade de produção de água. Isto deve-se à grande flexibilidade que os programas de simulação apresentam em adicionar ou eliminar tubagens, estações elevatórias ou sobreprensoras e reservatórios e alterar as condições de consumo nos nós (os modelos SIMRED/HS e SIDINA/HS estão particularmente vocacionadas para este tipo de análise sem ser necessário alterar o ficheiro de dados iniciais).

Dimensionamento do sistema: A utilização de modelos computacionais de equilíbrio hidráulico permite dotar o engenheiro projectista de um método eficiente de análise de soluções alternativas no dimensionamento de novos sistemas ou na remodelação e ampliação de sistemas já existentes. Estas análises permitirão identificar os diâmetros e as classes mais adequadas para as condutas adutoras e de distribuição e as localizações de reservatórios, estações elevatórias ou outros elementos especiais para o conveniente funcionamento hidráulico do sistema de distribuição. Uma análise dos custos das soluções alternativas permite determinar a solução mais económica.

Conhecimento global e integrado do sistema: O processo de recolha e tratamento dos dados sobre os consumos, as características físicas das tubagens e dos outros órgãos do sistema, por um lado, e o desenvolvimento do modelo, a sua calibração e exploração, por outro, conduzem, sem dúvida, a um conhecimento global e integrado do sistema de distribuição, objectivo impossível de atingir com facilidade pelos métodos tradicionais de análise baseados, na maior parte dos casos em Portugal, no empirismo. Um conhecimento global e integrado do sistema permite uma maior segurança e qualidade do serviço prestado por parte do pessoal de campo afecto à exploração e uma muito maior capacidade de decisão por parte dos responsáveis, com base na avaliação rápida das condições de funcionamento do seu sistema de distribuição de água.

APÊNDICE I

A.1 - Programa REDMAR/HS

O programa REDMAR/HS, sigla abreviada para REDes MAlhadas e Ramificadas, em FORTRAN, bastante eficiente e de simples utilização destina-se à análise do equilíbrio hidráulico de sistemas de distribuição de água ramificados, malhados ou mistos.

As características gerais do programa são as seguintes:

1. O sistema de distribuição pode ser de qualquer tipo (malhado, ramificado ou misto) com alimentação através de estações elevatórias (EE), reservatórios ou nós. Outros tipos de elementos especiais podem ser analisados pelo progra-

ma, tais como estações sobrepessoras (ESP), válvulas redutoras de pressão (VRP) e de retenção (VR).

2. O programa apresenta um conjunto de diferentes opções de utilização, que permitem a escolha do tipo de equação para o cálculo das perdas de carga (Manning-Strickler ou Hazen-Williams), do nível de informação dos resultados, do critério de convergência do processo iterativo e do sistema de unidades (métrico ou inglês).
3. O programa REDMAR/HS, para a obtenção da solução das condições de equilíbrio hidráulico do sistema, utiliza o método de Newton-Raphson, sendo as incógnitas as correções de caudal nas malhas. O programa automaticamente inicializa os caudais nos troços, constrói e numera as malhas do sistema, de tal forma que para a resolução do sistema de equações lineares em cada iteração é possível utilizar a factorização de Cholesky (matriz simétrica, positiva definida e em banda), o que reduz o tempo de execução e a memória de computador necessária.

Os dados de entrada (leitura formatada e englobando o programa procedimentos de verificação da sua consistência) podem agrupar-se em opções de entrada, definição dos troços e dos nós, definição do nó de referência e características dos elementos especiais. Para cada tubagem é necessário definir a sua numeração, o nó inicial e final, o comprimento, o diâmetro e os coeficientes de perda de carga localizada e de rugosidade. De forma idêntica, para cada nó é necessário definir o seu número, o consumo e a cota topográfica. O nó de referência é aquele a partir do qual são calculadas as cotas piezométricas e as pressões em todos os restantes nós. Os dados do nó de referência incluem o número do nó, a respectiva cota do nível de água e, no caso de se tratar de uma EE de alimentação, o número de bombas em paralelo e os coeficientes (A, B e C) da equação quadrática das curvas características do tipo $H = AQ^2 + BQ + C$. Para os restantes reservatórios ou EE de alimentação os dados de entrada são em tudo idênticos ao do nó de referência. Para as ESP há que indicar o número da tubagem em que se localizam, o número de bandas em paralelo e os coeficientes (A, B, C e D) do polinómio de grau 3 das curvas características do tipo $H = AQ^3 + BQ^2 + CQ + D$. Para as VR e VRP indica-se o número de tubagens em que estão inseridas e, no segundo caso, ainda a cota piezométrica máxima a jusante.

Os resultados principais obtidos do programa REDMAR/HS podem dividir-se em cinco grupos: opções definidas nos dados de entrada; listagem dos dados dos troços, a qual se destina principalmente à verificação dos dados de entrada; listagem dos dados relativos aos elementos especiais, também destinada à verificação dos dados de entrada; listagem do funcionamento hidráulico nos troços para as condições de equilíbrio (número do troço, comprimento, caudal, perda de carga total e unitária e velocidade (neste último caso assinalando os valores acima de um dado valor pré-definido); listagem do funcionamento hidráulico nos nós para as condições de equilíbrio (número do nó, cotas topográficas e piezométricas e pressão (neste último caso assinalando os valores acima ou abaixo de uma dada gama pré-definida).

A.2 - Programa SIMRED/HS

O program SIMRED/HS, sigla abreviada para SIMulação de REdes de Distribuição de Água, em FORTRAN, de âmbito bastante geral, eficiente e de simples utilização insere-se num estágio intermédio entre os programas REDMAR/HS e SIDINA/HS, destinando-se à análise de sistemas de distribuição de água malhados, ramificados ou mistos. O programa apresenta as seguintes potencialidades:

1. Cálculo das condições de equilíbrio hidráulico, permitindo análises subsequentes por alteração apenas de certos dados iniciais.
2. Simulação dinâmica (sucessivas condições de equilíbrio hidráulico em intervalos de tempo pré-definidos ao longo, por exemplo, de 24 horas) para análise do funcionamento do sistema em função das variações com o tempo do consumo nos nós, dos volumes armazenados nos reservatórios e das pressões (em nós ou nos reservatórios), neste último caso para controlar a condição operacional (ligada/desligada) das estações elevatórias (EE) e sobressoras (ESP).

As características gerais do programa SIMRED/HS podem resumir-se como a seguir se indica:

1. O sistema de distribuição pode ser de qualquer tipo (malhado, ramificado ou misto) com alimentação através de EE, reservatórios ou nós. Outros tipos de elementos especiais podem ser analisados, tais como: ESP, VRP, válvulas reguladoras de caudal e VR. O programa permite fazer a análise do equilíbrio hidráulico considerando seccionadas certas tubagens do sistema.
2. O programa apresenta um conjunto de diferentes opções de utilização, que permitem a escolha do sistema de unidades (métrico ou inglês), do tipo de equação para o cálculo das perdas de carga (Hazen-Williams ou Darcy-Weisbach), do nível de informação dos resultados, do critério de convergência, da numeração sequencial ou não das tubagens e a forma dos dados relativos a EE ou ESP.
3. O programa SIMRED/HS, para a obtenção da solução das condições de equilíbrio hidráulico do sistema, utiliza o método da teoria linear para a linearização das equações de conservação da energia para as malhas. A resolução do sistema de equações lineares em cada iteração utiliza técnicas eficientes de matrizes esparsas, o que permite reduzir o tempo de execução e a memória de computador necessária. O programa automaticamente constrói as malhas do sistema e inicializa os caudais nos diferentes troços.

Os dados de entrada (leitura formatada e englobando o programa procedimentos de verificação da sua consistência), para além dos que são específicos da simulação dinâmica (descritos mais adiante), compreendem o título da execução, a definição dos troços e dos nós e as características dos elementos especiais.

Para cada tubagem é necessário definir o nó inicial e final, o comprimento, o diâmetro, o coeficiente de rugosidade, o somatório dos coeficientes de perda de carga localizada, a potência útil se existir uma estação elevatória e se for esta a opção de entrada, a cota piezométrica do nível de água no reservatório (se a tubagem estiver ligada a um nó deste tipo) e o número da tubagem (apenas se se pretender que a ordem de entrada dos dados seja arbitrária). É nos dados das tubagens que é assinalada a existência de VR e a possibilidade de seccionar a respectiva tubagem. Só existem dados de entrada para os nós quando existam caudais concentrados (entradas e saídas) e/ou se pretendam calcular as correspondentes pressões. Neste caso, é necessário definir o seu número, o consumo e a respectiva cota topográfica.

As VRP são definidos pelo número do nó de montante, do troço onde ela se insere e pela cota piezométrica máxima a jusante. Para as EE ou ESP, caso a sua definição ainda não tenha sido feita através da potência útil, é necessário introduzir três pontos das curvas características (H,Q) e o número da tubagem onde elas se inserem.

Os resultados principais do programa SIMRED/HS incluem essencialmente dois qua-

dros, um correspondente aos troços (número da tubagem, nó inicial e final, caudal, perdas de carga total, unitária e localizada, altura de elevação se existirem EE ou ESP e velocidade) e outro relativo aos nós (número do nó, consumo, cotas piezométrica e topográfica e pressão). Para além disso, pode ser obtido um outro quadro resumo dos dados iniciais, o qual se destina à verificação dos mesmos. Se o utilizador o desejar, os quadros anteriores podem ser simplificados, através da definição apenas das tubagens e dos nós para os quais se pretendem os resultados. Nesta versão simplificada são sempre fornecidas as condições de funcionamento das EE (ou ESP), um resumo dos caudais entrados ou saídos nos nós da cota piezométrica fixa e assinaladas as tubagens seccionadas.

Em complemento podem ser obtidos quadros resumo das pressões máximas e mínimas no sistema, através da definição dos nós para os quais se pretenda esta informação. Esta opção tem especial interesse para a modalidade de simulação dinâmica.

Os dados adicionais para a simulação dinâmica compreendem os instantes inicial e final e o respectivo passo de cálculo (por exemplo, simulação ao longo de 24 horas de hora a hora), as cotas máximas e mínimas dos níveis de água nos reservatórios, os diâmetros destes e as condições no início da simulação. Os dados correspondentes ao controle operacional das EE ou ESP através das pressões (nos nós ou nos reservatórios) compreendem o número da tubagem a que se refere o controle, o número do nó que controla e os valores máximo e/ou mínimo da pressão respectiva. A variação do consumo nos nós com o tempo é dada por leitura de dados na modalidade de análises subseqüentes do sistema, descrita mais adiante.

Os resultados da simulação dinâmica compreendem quadros idênticos aos da análise das condições de equilíbrio hidráulico, agora para os diferentes instantes ao longo do período de simulação, para além da indicação, para cada reservatório, do caudal e da cota do nível de água no instante respectivo.

A concepção do programa SIMRED/HS permite, de uma forma eficiente e com base nos dados iniciais, proceder a sucessivas análises do equilíbrio hidráulico por modificação de condições específicas do sistema ou realizar a simulação dinâmica por definição de alterações verificadas em instantes pré-definidos, para além dos já anteriormente referidos. Estas modificações ou alterações são codificadas de forma semelhante em ambos os casos. Assim, podem ser realizadas modificações das tubagens (comprimentos, diâmetros, rugosidades, etc.), incluindo o respectivo seccionamento, mas sem que sejam permitidas mudanças da sua localização no sistema (nós de ligação), das características das EE (ou ESP) e das condições de energia nos nós de cota piezométrica fixa (reservatórios). Os consumos nos nós (em todos ou em parte) podem ser modificados, sendo através desta modificação que são introduzidas as variações de consumo com o tempo.

A nível de resultados, a cada alteração ou conjunto de alterações introduzidas são obtidos quadros em tudo idênticos aos anteriormente referidos para análise do equilíbrio hidráulico ou simulação dinâmica do sistema.

A.3 - Programa SIDINA/HS

O programa SIDINA/HS, sigla abreviada para Simulação DINâmica de Sistemas de Distribuição de Água, em FORTRAN, é o de âmbito mais geral de entre os descritos, poderoso, embora complexo, e orientado para a análise de sistemas de distribuição de água malhados, ramificados ou mistos que apresenta as seguintes potencialidades:

1. Cálculo das condições de equilíbrio hidráulico, permitindo análises subseqüentes por alteração apenas de certos dados iniciais.

2. Dimensionamento de componentes dos sistemas, tais como alturas de elevação e capacidades de estações elevatórias (EE) ou sobressessoras (ESP) e/ou diâmetro das tubagens.
3. Análise económica incluindo as componentes em capital fixo e exploração (energia).
4. Simulação dinâmica do sistema em função de leis temporais de consumo nos nós e das capacidades de armazenamento nos reservatórios, das regras de operação (pressão ou tempo) das EE e ESP, do controle do caudal em tubagens, pela operação de válvulas, e dos caudais de alimentação do sistema de acordo com pressões em nós e cotas dos níveis de água nos reservatórios.
5. Capacidades gráficas via "plotter" ou, ainda, por terminal gráfico a três dimensões, da topologia do sistema e das correspondentes soluções (equilíbrio hidráulico ou simulação dinâmica).

As características gerais do programa SIDINA/HS são as seguintes:

1. O sistema de distribuição pode ser de qualquer tipo (malhado, ramificado ou misto) com alimentação através de EE, reservatórios ou nós. Outros tipos de elementos especiais podem ser analisados, tais como: ESP, diversos tipos de válvulas (seccionamento, VRP, de pressão constante a montante, VR), orifícios e dispositivos de pressão diferencial. É permitida a fixação de caudais em determinadas tubagens e de pressão em certos nós de junção. Sempre que no sistema existam tubagens em paralelo, o programa considera, para efeitos do equilíbrio hidráulico, uma tubagem equivalente; a dimensão do problema fica assim reduzida e, conseqüentemente, o tempo de cálculo.
2. O programa apresenta cerca de 80 opções de utilização (todas elas com valores por defeito, alteráveis em função das exigências específicas de cada utilizador), salientando-se a escolha do sistema de unidades (métrico ou inglês), da equação a utilizar das perdas de carga (Manning-Strickler, Hazen-Williams ou Darcy-Weisbach), do nível de informação dos resultados, do critério de convergência e da técnica de resolução do sistema de equações lineares do método de Newton-Raphson.
3. A definição das EE e ESP pode ser feita ou por três pontos das curvas características (H,Q) ou pela potência útil.
4. Para a resolução do sistema de equações lineares do método de Newton-Raphson (equações das malhas)⁽¹⁾ o programa inclui três algoritmos alternativos: fatorização de Cholesky, quando a matriz Jacobiana é simétrica, positiva definida e após a sua transformação em banda; eficiente método de eliminação, se as VRP ou outros elementos especiais destroem a simetria da matriz Jacobiana, após a sua transformação em banda com a minimização da respectiva largura, através de um adequado ordenamento das equações e das incógnitas; técnicas de matriz esparsas, independentemente da propriedade de simetria da matriz Jacobiana. Em qualquer dos algoritmos a convergência é obtida, em geral, entre 4 e 10 iterações, independentemente da complexidade e da dimensão do sistema de distribuição.

A introdução dos dados de entrada do programa SIDINA/HS (leitura com formato livre e englobando o programa uma vasta gama de procedimentos de verificação,

(1) - Para uma análise mais detalhada deste aspecto, consultar RIBEIRO DE SOUSA 1984a; RIBEIRO DE SOUSA 1984b.

ou até de dupla verificação, da sua consistência) é feita associando ao conjunto de dados correspondente a cada tipo de componente do sistema o nome de um comando (a ordem de entrada dos comandos é arbitrária). Os dados associados a cada comando, do mesmo tipo dos dos modelos anteriormente descritos, obedecem a uma ordem tal que, no final da lista, figuram aquelas que mais frequentemente se mantêm constantes. Isto permite, por exemplo, a entrada do valor da rugosidade apenas para a primeira tubagem se as restantes tiverem o mesmo valor dessa rugosidade.

As análises subsequentes do sistema por alteração apenas de certos dados iniciais (neste caso a entrada de dados segue a mesma orientação da anterior) permite assegurar uma maior eficácia de utilização do programa, uma vez que se evita a criação de um novo ficheiro de dados, a definição interna das malhas de novo e garante-se uma melhor inicialização de caudais no método de Newton-Raphson. As alterações possíveis incluem: a multiplicação de todos ou de parte dos consumos nos nós por um factor multiplicativo; a modificação das rugosidades e dos diâmetros de todas ou de parte das tubagens; das cotas topográficas de todos ou de parte dos nós; das cotas dos níveis de água nos reservatórios ou de outros nós de alimentação da rede (EE); do número de bombas em paralelo ou em série nas EE ou ESP; dos coeficientes de perda de carga localizada; dos valores máximos da cota piezométrica a jusante das VRP e, finalmente, dos caudais fixados para certas tubagens. Esta modalidade confere ao programa uma grande flexibilidade para estudos de análise de sensibilidade de sistemas de distribuição.

Os resultados principais do programa, para além das opções definidas nos dados de entrada, incluem essencialmente dois quadros síntese das condições de equilíbrio hidráulico, um correspondente aos troços e outro relativo aos nós, idênticos aos definidos para os dois programas anteriores. Os resultados incluem, ainda, as alturas de elevação, as potências e as energias em EE ou ESP, as energias dissipadas no escoamento e as cotas piezométricas a montante e jusante de elementos especiais (VRP, VR, etc.).

A versão de dimensionamento determina alturas de elevação e capacidades das EE (ou ESP) e/ou diâmetros das tubagens, pela definição da pressão e do consumo exigidos em todas ou em certos nós do sistema. Na situação extrema da definição dupla destes parâmetros (pressão e consumo) para todos os nós do sistema é utilizado um algoritmo muito eficiente que não exige um processo iterativo para a obtenção da solução. Os diâmetros obtidos pelo programa são uma aproximação dos calculados teoricamente para os comerciais mais próximos, sendo a gama destes últimos declarada pelo utilizador, como dado de entrada. Uma forma alternativa de dimensionar componentes do sistema (EE, ESP, tubagens, etc.) consiste em fixar caudais nas tubagens, em vez de fixar pressões nos nós, e obter como solução as cotas piezométricas necessárias para que se atinjam esses caudais.

O programa SIDINA/HS permite a análise económica através da combinação dos investimentos em capital fixo e dos custos de exploração, em termos dos valores totais e individualizados actualizados de forma a ser possível a comparação de soluções alternativas e escolha da mais económica. Os dados de entrada (caracterizado pela sua simplicidade e flexibilidade) incluem: a taxa de actualização, a vida útil dos órgãos do sistema, o período de amortização e os preços da energia, das tubagens (para cada diâmetro nominal e por unidade de comprimento), dos reservatórios, das EE e ESP, dos órgãos acessórios e da água.

Na versão de simulação dinâmica o programa apresenta capacidades e uma flexibilidade dificilmente encontradas noutros programas para esse fim. Os dados de entrada adicionais (que seguem os mesmos princípios anteriores e dependem das

situações específicas a simular) englobam, para além dos instantes inicial e final e o correspondente passo de cálculo da simulação, o seguinte: curvas de consumo (ou factores de ponta adimensionais) função do tempo e os nós ou conjunto de nós aos quais elas se aplicam; volumes de armazenamento nos reservatórios em função das respectivas alturas de água; cotas máximas e mínimas dos níveis de água nos reservatórios respeitantes às situações operacionais cheio/vazio; regras de exploração e de situação operacional para controlar o número de bombas em funcionamento nas EE ou ESP (as primeiras definidas em função da pressão num determinado nó ou da cota do nível de água num reservatório, enquanto que as segundas são estabelecidas em função do tempo decorrido após o início da simulação); regras de exploração e de situação operacional para estabelecer as condições de variação das perdas de carga localizadas nas tubagens (grau de abertura ou de fecho de válvulas), ambas definidas tal como no caso anterior; definição prévia de caudais em certas tubagens em função do tempo ou de acordo com expressões que mantêm os níveis dos reservatórios (ou as cotas piezométricas em determinados nós) dentro de certos limites.

As regras de exploração e de situação operacional referidas permitem, em aplicações sofisticadas de gestão em tempo real, simular sistemas de distribuição equipados com sensores de automação e mecanismos de controle que operam, por exemplo, as aberturas ou o fechamento de válvulas para que se atinjam certos objectivos de funcionamento.

Os resultados obtidos da simulação dinâmica compreendem um vasto conjunto de informação (mais ou menos completo em função das exigências do utilizador), destacando-se o seguinte: quadros idênticos aos da análise do equilíbrio hidráulico, para os diferentes instantes ao longo do período de simulação; criação de um ficheiro de acesso directo que contém toda a informação de cada simulação.

Através da utilização de um programa auxiliar de processamento de dados, o utilizador pode selectivamente obter os seguintes resultados a partir do ficheiro de acesso directo: caudais em tubagens pré-determinadas; pressões num conjunto de nós; cotas dos níveis de água nos reservatórios e respectivos volumes entrados e/ou saídos durante a simulação; condições de exploração ou de situação operacional em certas EE ou ESP, etc.. Qualquer destes resultados pode ser obtido num dado instante ou ao longo do período de simulação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- {1} - HARDY CROSS 1936 - *Analysis of Flow in Network of Conduits or Conductors*, Bulletin No. 286, University of Illinois Experimental Station, Urbana, Illinois.
- {2} - SHAMIR, U.; HOWARD, C.D. 1968 - *Water Distribution System Analysis*, ASCE, J. of the Hydraulics Division, Vol. 94, No. HY1, pp. 214-234.
- {3} - WOOD, D.J.; CHARLES, O.A. 1972 - *Hydraulic Network Analysis Using Linear Theory*, ASCE, J. of the Hydraulics Division, Vol. 98, No. HY7, pp. 1157-1170.
- {4} - MELO BAPTISTA, J.; RIBEIRO DE SOUSA, E.A.; ALEGRE, H. 1983 - *Modelo Computacional para o Dimensionamento Económico de Sistemas Malhados de Distribuição de Água*, Congresso 83 da Ordem dos Engenheiros, Porto.
- {5} - RIBEIRO DE SOUSA, E.A. 1984a - *Modelação do Equilíbrio Hidráulico de Sistemas de Distribuição de Água. Parte I - Formulação do Problema*. Curso de Mestrado em Hidráulica e Recursos Hídricos. Departamento de Engenharia Civil. Instituto Superior Técnico, Lisboa.

- {6} - RIBEIRO DE SOUSA, E.A. 1984b - *Modelação do Equilíbrio Hidráulico de Sistemas de Distribuição de Água. Parte II - Métodos Numéricos de Resolução*. Curso de Mestrado em Hidráulica e Recursos Hídricos. Departamento de Engenharia Civil. Instituto Superior Técnico. Lisboa.
- {7} - RIBEIRO DE SOUSA; E.A.; COSTA, A. 1984 - *Implementação do Modelo Matemático do Sistema de Abastecimento de Água ao Concelho de Cascais*. I Simpósio Luso-Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental - Tema Sistemas de Produção e Distribuição de Água. Lisboa.