

03/10

II SIMPÓSIO LUSO-BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL

SALVADOR/BAHIA/BRASIL - 26 a 29 de Agosto de 1986

SIMULAÇÃO DE SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA MUNICIPAIS
EM MICROCOMPUTADOR

SISTEMA DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA: CAPTAÇÃO, ADUÇÃO, TRATAMENTO E DISTRIBUIÇÃO

EDUARDO RIBEIRO DE SOUSA

Doutor em Engenharia Civil, Professor Associado do Instituto Superior Técnico

Instituto Superior Técnico - Departamento de Engenharia Civil

Avenida Rovisco Pais - 1096 LISBOA CODEX - PORTUGAL

ULISSES LAGES

Engenheiro Civil

HIDROSISTEMAS - Estudos Especiais de Sistemas Hídricos e Ambientais, Lda.

Avenida de Berna, 13 - 6 Dto. - 1000 LISBOA - PORTUGAL

RESUMO

A presente comunicação tem por objectivo divulgar o trabalho desenvolvido pelos autores na área de simulação de sistemas de distribuição municipais, em Portugal, principalmente na perspectiva da utilização de microcomputadores. Assim, a comunicação inicia-se por uma apresentação dos princípios gerais de utilização de modelos computacionais na modelação dos sistemas, seguindo-se uma síntese dos métodos de formulação matemática e resolução das condições de equilíbrio hidráulico. Apresentam-se, depois, as características e potencialidades de um conjunto de três programas de computador, respectivamente para a preparação e edição interactiva dos ficheiros de dados, para a análise do equilíbrio hidráulico ou simulação dinâmica e para o processamento gráfico dos resultados.

1. INTRODUÇÃO

A possibilidade de analisar ou simular as condições de funcionamento hidráulico de sistemas de distribuição de água municipais constitui um aspecto fundamental para que se atinjam os objectivos de planeamento e se estabeleçam os procedimentos mais adequados de exploração ou, ainda, se possam prever as implicações nos sistemas de potenciais alterações ou ampliações dos mesmos. Para a resolução eficiente de uma grande parte destes problemas, a utilização de computadores, através da aplicação de modelos computacionais, tem um papel importante, senão decisivo, desde que analisadas as condições e as necessidades específicas de cada caso.

O desenvolvimento de métodos e técnicas numéricas de análise de sistemas de distribuição de água tem merecido uma grande atenção por diversos investigadores nos últimos quinze anos, tendo-se atingido, presentemente, um enorme nível de sofisticação dos correspondentes modelos computacionais. No entanto, a utilização de uma parte significativa destes modelos estava limitada apenas aos engenheiros que tinham acesso a computadores de grande capacidade, os quais são complexos e onerosos. Recentemente, com o aparecimento dos modernos microcomputadores a preços atraentes, reunindo significativas potencialidades e de utilização bastante "amigável", a perspectiva apontada irá progressivamente ser alterada no sentido de uma maior vulgarização na aplicação destas tecnologias pelos técnicos de engenharia de sistemas de distribuição de água.

Neste sentido, a presente comunicação tem por objectivo divulgar o trabalho que tem vindo a ser desenvolvido pelos autores nesta área do conhecimento, em Portugal, principalmente na perspectiva da utilização de microcomputadores. Assim, a comunicação inicia-se por uma apresentação dos princípios gerais de utilização de modelos computacionais na modelação de sistemas de distribuição de água municipais, seguindo-se uma síntese dos métodos de formulação matemática e resolução das condições de equilíbrio hidráulico dos sistemas. Apresentam-se, depois, as características e potencialidades de um conjunto de três programas, respectivamente para a preparação e edição interactiva dos ficheiros de dados, para a análise do equíli-

brio hidráulico ou simulação dinâmica e para o processamento gráfico dos resultados, qualquer deles implementados em microcomputadores utilizando o sistema operativo MS-DOS (Microsoft - Disk Operating System).

2. PRINCIPIOS GERAIS DE UTILIZAÇÃO DE MODELOS COMPUTACIONAIS

De acordo com o estado actual dos conhecimentos, é possível formular matematicamente e desenvolver algoritmos numéricos de âmbito geral destinados à análise e simulação hidráulica de sistemas de distribuição de água complexos e de grandes dimensões. Estes algoritmos devem permitir a análise de sistemas malhados, ramificados ou mistos com qualquer configuração topológica, incluindo um grande número de tubagens e de elementos especiais, tais como reservatórios, estações elevatórias, estações sobressoras, válvulas de seccionamento (perdas de carga localizadas), redutoras de pressão, de retenção, etc..

Para além da determinação das condições do equilíbrio hidráulico, em muitas das situações de análise de sistemas de distribuição de água é desejável proceder a uma simulação das condições de funcionamento do sistema, as quais variam lentamente ao longo de um certo período de tempo (simulação dinâmica). Por exemplo, a avaliação das flutuações dos níveis de água em reservatórios (enchimento ou esvaziamento) ao longo de um período de 24 horas constitui um aspecto de grande relevância para a análise das condições de operação de um dado sistema de distribuição de água. Na simulação dinâmica, a modelação do sistema consiste na obtenção de uma sequência de soluções de equilíbrio hidráulico para vários instantes ao longo de um certo período (período de simulação), ligadas entre si por um esquema de integração no tempo, com base nas leis de variação volume de armazenamento/cota ou altura de água nos reservatórios e das leis de flutuação do consumo nos nós. Uma das características importantes da simulação dinâmica é poder incluir lógicas de controle que representem regras de exploração dos sistemas. Assim, as estações elevatórias e sobressoras podem arrancar ou parar, as válvulas de diversos tipos podem abrir ou fechar, tendo em conta as flutuações de consumo, de pressão ou de nível de água nos reservatórios ou nos nós.

No entanto, o termo modelação matemática de um sistema de distribuição de água deve ser entendido como um processo complexo que é, simultaneamente, um problema de engenharia e de modelação. Neste processo, para além do instrumento fundamental que é o algoritmo numérico propriamente dito, está envolvido um conjunto de etapas e actividades em que o engenheiro deverá recorrer a todas as suas capacidades de análise e sistematização, de forma a estabelecer a maior ligação possível entre os conceitos teóricos envolvidos e os aspectos físicos e práticos do problema em análise. Consequentemente, um modelo matemático (ou computacional) de um dado sistema de distribuição de água compreende não só o programa de cálculo, mas também um conjunto de ficheiros de dados, nos quais se define a configuração e as características físicas dos sistemas e que servem de base para uma adequada análise do funcionamento hidráulico do mesmo.

A complexidade dos sistemas de distribuição de água municipais não permite, na maior parte dos casos, que sejam incluídos no modelo todos os pormenores físicos e todas as combinações possíveis das situações operacionais do mesmo. Por este motivo, um aspecto crucial na modelação dos sistemas é a definição da forma como se estabelece a ligação entre as técnicas numéricas do programa de computador e a descrição física do sistema. Para o efeito, é fundamental decidir criteriosamente sobre o nível de detalhe a incluir no modelo, de forma a maximizar, por um lado, a eficiência na execução das simulações e, por outro, a garantir que, apesar das simplificações, o modelo reproduza, com fiabilidade, o sistema de distribuição real em análise. Esta actividade, a qual é algumas vezes relegada indevidamente para um plano secundário, é designada usualmente por esquematização ou simplificação do sistema.

Por outro lado, a atribuição dos consumos aos nós, a definição dos coeficientes de rugosidade das tubagens e o estabelecimento das curvas características dos grupos electrobomba constituem matéria delicada, estando na base, em alguns casos, do fracasso de certos modelos desenvolvidos. De facto, o engenheiro ao desenvolver um modelo computacional de um sistema de distribuição de água municipal não deve dei-

xar-se iludir pela enorme rapidez e capacidade com que o programa de computador produz resultados, inclusivamente com um grande número de casas decimais; pelo contrário, deve dedicar a máxima atenção aos dados fornecidos ao modelo, uma vez que o rigor dos resultados é quanto muito igual aos daqueles dados.

Como, por outro lado, os dados fornecidos ao modelo envolvem sempre um certo nível de subjectividade e de imprecisão, é igualmente crucial proceder à calibração do modelo, ou seja, ao ajuste dos parâmetros de forma a conseguir a máxima concordância possível entre os valores medidos no protótipo e os calculados pelo modelo.

Com todo o rigor, o modelo de um sistema de distribuição de água só deve ser utilizado para dele tirar conclusões e recomendações definitivas (exploração intensiva) após a finalização do processo de calibração. No entanto, esta afirmação não invalida que, em certos casos, não seja possível propor alterações ou modificações ao sistema existente antes de proceder à calibração do modelo.

3. FORMULAÇÃO MATEMÁTICA E RESOLUÇÃO DAS CONDIÇÕES DE EQUILÍBRIO HIDRÁULICO

O equilíbrio hidráulico de sistemas de distribuição de água malhados ou mistos é baseado nas duas leis fundamentais da mecânica dos fluidos, a da continuidade e da conservação da energia, e, para além disso, numa relação entre o caudal (ou velocidade) e a perda de carga (ou variação de pressão), estabelecida através das equações de Darcy-Weisbach (associada à equação implícita de Colebrook-White), Manning-Strickler ou Hazen-Williams.

Para a formulação matemática das condições de equilíbrio hidráulico de um sistema de distribuição de água malhado ou misto, em regime permanente, é possível equacionar o problema por três vias alternativas: equações dos troços, que consiste em escrever as equações de continuidade (lei dos nós) e da conservação da energia (lei das malhas), em termos do caudal de 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 da conservação da energia em termos das correcções de caudal em cada malha.

No caso das equações dos troços, é possível escrever tantas equações de continuidade e da conservação da energia quantas as tubagens que constituem o sistema. Para cada n.º de junção, e apenas para os n.ºs deste tipo, as equações de continuidade podem ser traduzidas pela seguinte expressão:

$$\sum_{j=1}^{NC} Q_{ji} = Q_i \quad (N \text{ equações}) \quad (1)$$

sendo Q_{ji} o caudal convergente no n.º i a partir do n.º j , NC o número de tubagens convergentes no n.º i e Q_i o caudal entrado ou saído (consumo concentrado no n.º) no n.º de junção i .

Para cada uma das malhas naturais, as equações da conservação da energia podem ser traduzidas pela seguinte expressão:

$$\sum_{\ell=1}^{NT} \Delta H_{\ell} - \sum_{j=1}^{NB} E_{bj} = 0 \quad (M \text{ equações}) \quad (2)$$

sendo ΔH_{ℓ} a perda de carga total da tubagem de ordem ℓ e pertencente à malha para a qual está a ser escrita a equação, incluindo as perdas de carga localizadas, E_{bj} a energia fornecida ao sistema nessa malha pela estação elevatória ou sobressora j , NT o número de tubagens na malha e NB o número de estações elevatórias ou sobressoras na malha.

Por outro lado, se existirem F n.ºs de cota piezométrica fixa, podem ser definidas $(F - 1)$ equações independentes da conservação da energia, para os percursos entre dois n.ºs de cotas piezométricas fixas (por exemplo, dois reservatórios), com a seguinte forma:

$$\sum_{\ell=1}^{NT} \Delta H_{\ell} - \sum_{j=1}^{NB} E_{bj} = \Delta E \quad (F - 1 \text{ equações}) \quad (3)$$

sendo ΔE a diferença de cotas piezométricas entre os dois n.ºs considerados e os restantes símbolos têm o significado anteriormente referido. Note-se que a equação (2) pode ser considerada como um caso particular da equação (3), em que ΔE é zero para uma malha natural.

As equações da conservação da energia (equações (2) e (3)) podem ser expressas em função dos caudais nas tubagens, os quais constituem as incógnitas do problema, da forma que a seguir se indica. A perda de carga total numa tubagem ℓ do sistema de distribuição pode ser expressa em termos do caudal Q_ℓ e do respectivo coeficiente de perda de carga da tubagem K_ℓ (função do comprimento, do diâmetro arbitrado e do coeficiente de rugosidade), através da seguinte expressão:

$$\Delta H_\ell = K_\ell Q_\ell^n = K_\ell Q_\ell |Q_\ell|^{n-1} \quad (4)$$

Nesta formulação, assim como nas restantes, é fundamental definir o sentido de escoamento em relação ao qual o caudal é considerado como positivo (sentido directo ou retrógrado para as malhas naturais ou, ainda, no sentido da cota piezométrica mais elevada para a mais baixa, no caso das malhas imaginárias). Na expressão (4) ao escrever-se $Q_\ell |Q_\ell|^{n-1}$ pretende-se atingir o objectivo referido. Uma via alternativa de concretizar o mesmo objectivo, consiste em escrever estes termos sob a forma $\text{sgn } Q |Q|^n$, atribuindo-se a $(\text{sgn } Q)$ o valor +1 se $Q > 0$ e -1, no caso contrário. Por exemplo, se $Q = -5$ l/s, e $n = 2$ (fórmula de Manning-Strickler), $\text{sgn}(-5) |-5|^2 = (-1)(25) = -25$ l/s.

Por outro lado, as curvas características dos grupos electrobomba das estações elevatórias ou sobrepessoras podem ser aproximadas por uma equação quadrática (obtida a partir de pares de valores (Q, H) , do seguinte tipo:

$$E_b = A Q^2 + BQ + C \quad (5)$$

sendo E_b a energia fornecida ao sistema pela estação elevatória ou sobrepessora, Q o caudal que passa pelas bombas e A , B e C parâmetros.

Substituindo as expressões do tipo (4) e (5) nas equações (2) e (3) anteriores, obtêm-se um conjunto de equações não-lineares, as quais incluem apenas os caudais nas tubagens do sistema de distribuição, que constituem as incógnitas do problema. Na sua globalidade, este problema resume-se, de facto, à resolução de um sistema de equações com N equações lineares (continuidade nos nós de junção) e $[M + (F-1)]$ equações não-lineares.

Para o caso das equações dos nós, a análise é baseada em termos das cotas piezométricas em cada nó de junção do sistema de distribuição, que constituem as incógnitas, por combinação da equação da energia para cada tubagem com a equação da continuidade.

A equação da perda de carga total para uma tubagem entre os nós j e i é dada por $\Delta H_{ji} = K_{ji} Q_{ji}^{n_{ji}}$, a qual pode ser escrita, em alternativa, da seguinte forma:

$$H_j - H_i = K_{ji} \operatorname{sgn} Q_{ji} |Q_{ji}|^{n_{ji}} \quad (6)$$

sendo H_j e H_i as cotas piezométricas nos nós de junção j e i , respectivamente, K_{ji} o coeficiente de perda de carga na tubagem do nó j para o nó i , Q_{ji} o caudal escoado na tubagem do nó j para o nó i e n_{ji} o expoente da fórmula de perda de carga na tubagem do nó j para o nó i .

Por outro lado, uma vez que a perda de carga é do mesmo sinal do sentido do escoamento, o que equivale a $\operatorname{sgn} Q_{ji} = \operatorname{sgn} (H_j - H_i)$, a expressão anterior pode ser resolvida em ordem a Q , obtendo-se:

$$Q_{ji} = \operatorname{sgn} (H_j - H_i) (|H_j - H_i|/K_{ji})^{1/n_{ji}} \quad (7)$$

Nesta expressão considera-se que não existem estações elevatórias ou sobrepessoras na respectiva tubagem. Substituindo-se a expressão (7) na equação da continuidade (6), obtêm-se:

$$\sum_{j=1}^{NC} \operatorname{sgn} (H_j - H_i) (|H_j - H_i|/K_{ji})^{1/n_{ji}} = Q_i \quad (N \text{ equações}) \quad (8)$$

que representa a equação da continuidade para o nó de junção i , no qual convergem NC tubagens, em termos da cota piezométrica em i (H_i) e das cotas piezométricas nos nós adjacentes j (H_j), com $j=1,2,\dots,NC$.

No caso de existirem estações elevatórias ou sobrepessoras no sistema de distribuição, estas são consideradas na formulação matemática do problema por ampliação do conjunto de equações anteriores, criando dois nós de junção adicionais, imediatamente a montante e jusante, respectivamente. Desta forma, podem ser escritas duas equações adicionais expressas em termos das cotas piezométricas a montante

e a jusante da estação elevatória ou sobrepessora (que são novas incógnitas) e das cotas piezométricas dos correspondentes nós adjacentes. A primeira equação define o princípio da continuidade do caudal nas tubagens a montante e a jusante da estação (utilizando expressões do tipo da equação (6)), enquanto que a segunda traduz a variação de energia que ocorre pela passagem do caudal na estação elevatória ou sobrepessora.

Na sua globalidade, a formulação das condições de equilíbrio hidráulico de um sistema de distribuição de água com N nós de junção e NB estações elevatórias e/ou sobrepessoras, através das equações dos nós, resume-se de facto, à resolução de um sistema de $N + 2 NB$ equações não-lineares.

No caso das equações das malhas, a formulação do problema é baseada apenas nas equações da conservação da energia, de tal forma que se verifique o princípio da continuidade nos nós, para uma estimativa inicial de caudais nas tubagens. A partir daqui o problema consiste em corrigir estes caudais iniciais garantido sempre a continuidade nos nós:

Como se referiu anteriormente, a perda de carga numa tubagem ℓ do sistema de distribuição pode ser expressa em termos do caudal Q_ℓ e do respectivo coeficiente de perda de carga da tubagem K_ℓ , através da expressão (4). No entanto, o caudal Q_ℓ pode ser entendido como a soma de duas parcelas. A primeira, designada por $Q_{0\ell}$, representa uma estimativa inicial do caudal na tubagem definida de tal forma que, para o sistema de distribuição em conjunto, se verifique o princípio da continuidade nos diferentes nós, e a segunda parcela, designada por ΔQ_m , que corresponde à correcção de caudal relativa à malha que inclui a tubagem ℓ . Nestas condições, o conjunto de equações que descreve o equilíbrio hidráulico do sistema de distribuição é o seguinte:

$$\sum_{\ell=1}^{NT} K_\ell [\text{sgn}(Q_{0\ell} + \Delta Q_m)] |Q_{0\ell} + \Delta Q_m|^n - \sum_{j=1}^{NB} E_{bj} = 0 \quad (M \text{ equações}) \quad (9)$$

$$\sum_{\ell=1}^{NT} K_{\ell} [\text{sgn}(Q_{0\ell} + \Delta Q_m)] |Q_{0\ell} + \Delta Q_m|^n - \sum_{j=1}^{NB} E_{bj} = \Delta E \quad (\text{F-1 equações}) \quad (10)$$

sendo $Q_{0\ell}$ a estimativa inicial do caudal na tubagem ℓ , ΔQ_m a correcção de caudal na malha m , E_{bj} a energia fornecida ao sistema pela estação elevatória ou sobrepressora j pertencente à malha m , ΔE a diferença entre as cotas piezométricas nos dois nós de cota piezométrica fixa na malha imaginária m , NT o número de tubagens pertencentes à malha m e NB o número de estações elevatórias ou sobrepressoras na malha m .

Nas equações anteriores os $Q_{0\ell}$ são constantes para cada tubagem e não se alteram de iteração para iteração.

O problema anterior resume-se, portanto, à construção e resolução de um sistema de $[M + (F-1)]$ equações não-lineares, cujas incógnitas são as correcções de caudal nas diferentes malhas do sistema (ΔQ_m), quer se tratem de malhas naturais ou imaginárias.

No que respeita aos métodos numéricos de resolução, o mais antigo e o de maior divulgação é, sem dúvida, o de Hardy Cross (HARDY CROSS 1936), 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 fluidos. 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 algoritmos numéricos desenvolvidos 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

nea 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).

4. ALGORITMO COMPUTACIONAL PARA ANÁLISE HIDRÁULICA

Com base nas técnicas e nos princípios enunciados anteriormente foi implementado pelos autores um algoritmo para análise do equilíbrio hidráulico e simulação dinâmica de sistemas de distribuição de água em microcomputador utilizando o sistema MS-DOS, adaptado de uma versão de um mesmo programa para um computador "mainframe" (RIBEIRO DE SOUSA 1984a). O programa, escrito em linguagem FORTRAN e designado por SIDINA/MICRO, sigla abreviada para Simulação DINâmica de Sistemas de Distribuição de Água - Versão para MICROcomputador, é de âmbito bastante geral, eficiente e está orientado para análise de sistemas malhados, ramificados ou mistos complexos e de grandes dimensões⁽¹⁾. Sumariamente, apresenta as seguintes potencialidades:

1. Cálculo das condições de equilíbrio hidráulico, permitindo análises subsequentes 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 sobressoras (ESP) e/ou diâmetro das tubagens.
3. 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.

As características gerais do programa SIDINA/MICRO 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

(1) - Na sua versão actual o programa SIDINA/MICRO permite analisar sistemas com um máximo de 500 tubagens.

válvulas (seccionamento, válvulas redutoras de pressão (VRP), de pressão constante a montante, válvulas de retenção (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 da equação a utilizar no cálculo 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 Newton-Raphson.
3. A definição das curvas características das EE e ESP pode ser feita por três ou mais pares de valores (H,Q) ou pela potência útil.
4. Para a resolução do sistema de equações lineares do método de Newton-Raphson (equações das malhas)⁽²⁾ o programa inclui três algoritmos alternativos: factorização 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 matrizes 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.

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

A estrutura dos dados de entrada do programa SIDINA/MICRO (leitura com formato livre e englobando o programa uma vasta gama de procedimento, de verificação) 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 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.

Para a preparação dos ficheiros de dados ou edição de um ficheiro já existente, tirando partido das características dos microcomputadores, os autores desenvolveram um programa de processamento interactivo para esse fim. Este programa, igualmente escrito em linguagem FORTRAN, é designado por SIDADOS/MICRO, sigla abreviada para Simulação Dinâmica de Sistemas de Distribuição de Água - Preparação de Ficheiros de DADOS - Versão para MICROcomputador. No Quadro 1 apresenta-se a listagem de um exemplo de um ficheiro de dados criado pelo programa interactivo SIDADOS/MICRO.

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, uma nova definição interna das malhas 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 do sistema (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

QUADRO 1 - Exemplo de um ficheiro de dados criado pelo
programa interactivo SIDADOS/MICRO

PROGRAMA SIDINA/MICRO

EXEMPLO DE APLICACAO - SIMULACAO DINAMICA
DURANTE 24 H COM INTERVALOS DE 1 HORA
PARA UM TIPO DE FUNCAO DE CONSUMO

```

*/
OPCA01
1 1 4 2 4 1.0 1 1 2 0 1 0 0 0 1
TUBAGENS
1 1 2 800 0.3 .012
2 1 3/
3 2 3 700 0.25/
4 2 4 1100 0.20/
5 2 5 1150 0.30/
6 5 6 830 0.25/
7 6 7 400/
8 3 6 1200/
9 3 4 850/
10 3 8 800 0.20/
11 9 1 500 0.30/
12 10 101 250 .45/
121 101 2 350/
9999/
NODADOS
1 0. 105. 46. 104./
2 14.2 105. 113.5 141.5/
3 7.1 105. 113.5 75./
4 11.4 105. 194. 75./
5 14.2 105. 219. 117.5/
6 11.3 105. 219. 40./
7 14.2 105. 256. 40./
8 4.2 105. 46. 40./
101 0. 105. 113.5 175./
9 0. 146. 1. 104./
10 0. 123. 113.5 205./
9999/
RESERVATORIOS
9 148.5
9999/
BOMBAS
10 70.8 40.0 84.9 37.9 113.3 34.0 120.
9999/
PCLOCALIZADA
8 2.5/
9999/
FIM /
OPCA02
0. 24. 0. 1 0 4 1 0 0 1 1 1/
NOQUADROS
1-8/
RESVQUADROS
COMPLETOS
SOLEIRA
FIM QUADROS
CONSFUNCAO
1 1 0.9 2 0.83 3 0.80 4 0.81 5 0.9 6 1.3
7 1.7 8 2.1 9 2.26 10 2.3 11 2.26 12 2.2
13 2.24 14 2.10 15 2.16 16 2.40 17 2.70
18 2.8 19 2.8 20 2.7 21 2.3 22 1.87 24 1.0/
1-8 101/
9999/
RESVFUNCAO
1 150. 8940.0 148. 4470.0 146. 0.0/
9/
9999/
FIM SIMULACAO

```

Dados adicionais para simulação
dinâmica

sensibilidade de sistemas de distribuição de água.

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. Os resultados incluem, ainda, as alturas de elevação, as potências e as energias consumidas em EE ou ESP, as energias dissipadas no escoamento e as cotas piezométricas a montante e a 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 todos ou em certos nós do sistema. Na situação extrema da definição dupla destes parâmetros (pressão e consumo) para 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.

Na versão de simulação dinâmica o programa apresenta capacidades e uma flexibilidade de dificilmente encontradas noutros programas para esse fim. Os dados de entrada adicionais (que seguem os mesmos princípios anteriores, dependem das situações específicas a simular e são preparados também por utilização do programa SIDADOS/MICRO) 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. No Quadro 2 apresenta-se um exemplo ilustrativo do ficheiro de resultados obtido pelo programa SIDINA/MICRO, o qual corresponde à síntese da topologia e ao funcionamento hidráulico para o instante 8 horas, relativas às condições de simulação dinâmica do ficheiro de dados do Quadro 1.

Um dos aspectos negativos na condução de análises de equilíbrio hidráulico e/ou simulação dinâmica de sistemas de distribuição de água é a obtenção de um grande volume de resultados, o que obriga o utilizador a dispender tempo na análise desses mesmos resultados, de forma a poder salientar os pontos principais. Assim, tirando partido das enormes potencialidades gráficas que podem ser obtidas em microcomputadores, os autores desenvolveram um programa interactivo de processamento gráfi

QUADRO 2 - Exemplo de um ficheiro de resultados do programa SIDINA/MICRO. Síntese da topologia e das condições de funcionamento hidráulico (instante: 8 horas)

 * SIMULACAO DINAMICA DE SISTEMAS DE DISTRIBUICAO DE AGUA
 *-----
 * P R O G R A M A S I D I N A / M I C R O
 *-----

P R O G R A M A S I D I N A / M I C R O
 EXEMPLO DE APLICACAO - SIMULACAO DINAMICA
 DURANTE 24 H COM INTERVALOS DE 1 HORA
 PARA UM TIPO DE FUNCAO DE CONSUMO

FACTOR MULTIPLICATIVO DOS CONSUMOS: 1.0000

TUBAGENS: 13
 NOS: 11
 ELEVATORIAS: 1
 SOBRESSORAS: 0
 RESERVATORIOS: 1
 PC LOCALIZADAS: 1
 VR PRESSAO: 0
 ORIFICIOS: 0
 V P CONSTANTEI: 0
 PRESSAO DIFERENCIAL: 0
 CAUDAIS DADOS: 0
 NOS RELATIVOS A E. ELEVATORIAS E RESERVATORIOS QUE FORAM RETIRADOS:
 9 10

E. ELEVATORIAS:
 TUBG COEF 2A. ORDEM COEF LINEAR ALT ELEVACAO COTA PIEZ
 EM VAZIO ASPIRACAO
 12 273.227 -191.477 52.19 120.00

RESERVATORIOS E ORIFICIOS:
 NO. TUB NO COTA PIEZ
 1 11 9 148.50

P. C. LOCALIZADAS - TUBAGENS E COEFICIENTES:
 TUBG K

TUBG	K	1	2	-11	3	4	5	-121	9	10
1	1	.000								
2	2	.014	-1							
3	3	.007	-2	-3	8	9	10			
4	4	.011	-4	-9						
5	5	.014	-5	6						
6	6	.011	-6	7	-8					
7	7	.014	-7							
8	8	.004	-10							
9	101	.000	-12	121						

ABERTO O FICHEIRO NO. 40 PARA QUADROS DOS NOS
 ABERTO O FICHEIRO NO. 41 PARA QUADROS DOS RESERVATORIOS
 PERDAS DE CARGA LOCALIZADAS:
 TUBAGEM COEFICIENTE COMP. EQUIVALENTE
 NO. DE PCL X COMP. EQUIVALENTE

8 2.50 1221.95

E. ELEVATORIAS:
 NO TUBG ALTURA CAUDAL POTENCIA ENERGIA
 ELEVACAO CV KW KWH
 10 12 30.49 142.18 56.9 42.5
 42.5
 QUADROS PARA O INSTANTE = 28800.00
 UNIDADES DOS RESULTADOS:

DIAMETROS METRO
 COMPRIMENTOS METRO
 COTAS PIEZOMETRICAS METRO
 COTAS TOPOGRAFICAS METRO
 PRESSOES KN/M2
 CAUDAIS METRO
 P. CARGA CALCULADAS PELA FORMULA DE MANNING

QUADRO RESUMO DOS RESULTADOS NAS TUBAGENS

TUBG	NOS	DE	PARA	COMP	DIAM	RUGOSI	DADE	CAUDAL	VELOC	PERDA P. CARGA
1	2	1	1	800.	.300	.0120	.0120	18.737	.265	.256
2	1	3	3	800.	.300	.0120	.0120	37.417	.529	1.021
3	2	3	3	700.	.250	.0120	.0120	27.511	.500	1.277
4	2	4	4	1100.	.300	.0120	.0120	13.180	.420	1.376
5	2	5	5	1150.	.300	.0120	.0120	52.932	.749	2.533
6	5	6	6	830.	.250	.0120	.0120	23.112	.471	1.068
7	6	7	7	400.	.250	.0120	.0120	29.820	.607	2.143
8	3	6	6	1222.	.250	.0120	.0120	30.438	.620	2.232
9	3	4	4	850.	.250	.0120	.0120	10.760	.219	.279
10	3	8	8	800.	.200	.0120	.0120	8.820	.281	.493
11	9	1	1	500.	.300	.0120	.0120	18.680	.264	.318
12	10	101	101	250.	.450	.0120	.0120	142.180	.894	530
121	101	2	2	350.	.450	.0120	.0120	142.180	.894	742
VALORES MEDIOS DA VELOCIDADE E DA PERDA DE CARGA UNITARIA										.52
VALORES MAXIMOS E MINIMOS DA VELOCIDADE										.89
QUADRO RESUMO DOS RESULTADOS NOS NOS										

NO	CONSUMO (L/S)	COTA TOPO	ALT. PIEZOM	PRESSAO	PIEZOM	COTA PIEZOM
1	.00	105.00	43.96	430.79	148.94	148.94
2	29.82	105.00	44.21	433.30	149.21	149.21
3	14.91	105.00	42.94	420.79	147.94	147.94
4	23.94	105.00	42.70	418.47	147.70	147.70
5	29.82	105.00	41.28	404.53	146.28	146.28
6	23.73	105.00	40.21	394.06	145.21	145.21
7	29.82	105.00	39.35	385.66	144.35	144.35
8	8.82	105.00	42.45	415.96	147.45	147.45
101	.00	105.00	44.96	440.57	149.96	149.96
10	-142.18	123.00	27.49	269.36	150.49	150.49
9	-18.68	146.00	3.12	30.53	149.12	149.12

VALORES MEDIOS DAS ALTURAS E COTAS PIEZOMETRICAS 42.45 147.45
 VALORES MAXIMOS E MINIMOS DA ALTURA PIEZOMETRICA 44.96 39.35

co dos resultados armazenados no ficheiro de acesso directo durante a execução do SIDINA/MICRO. Este programa, igualmente escrito em linguagem FORTRAN e designado por SIDIGRA/MICRO, sigla abreviada para Simulação Dinâmica de Sistemas de Distribuição de Água - Processamento GRáfico - Versão para MICROcomputador, apresenta na sua versão actual um "menu" de quinze opções de traçado gráfico, das quais se podem salientar, a título de exemplo, a esquematização do sistema e as isolinhas de cotas ou alturas piezométricas num dado instante de simulação, as variações dos níveis de água nos reservatórios, das velocidades ou das perdas de carga em tubagens pré-determinadas e das pressões em nós pré-seleccionados. Qualquer destas opções pode ser obtida em terminal gráfico, em impressora de matriz por pontos ou em traçador de gráficos ("plotter").

A título ilustrativo, apresentam-se nas Figuras 1 e 2 exemplos de algumas das opções de utilização do programa SIDIGRA/MICRO. Na primeira inclui-se uma esquematização completa e as correspondentes isolinhas de cotas piezométricas, em qualquer dos casos para o sistema de distribuição do ficheiro de dados do Quadro 1 e para o instante 8 horas.

A Figura 2 ilustra as flutuações do nível de água num reservatório e da cota piezométrica num nó ao longo de um período de simulação de 24 horas, para o sistema de distribuição de água à cidade de Lisboa de Campo de Ourique-Monsanto (HIDROSISTEMAS 1986). Neste caso, para além dos valores calculados para o programa SIDINA/MICRO, encontram-se assinalados, ainda, os correspondentes valores medidos no protótipo.

A terminar refira-se que os programas de computador apresentados têm vindo a ser utilizados em diversos casos práticos, em Portugal, dos quais se salientam os sistemas de abastecimento de água aos concelhos de Cascais (RIBEIRO DE SOUSA e COSTA 1984; HIDROPROJECTO/HIDROSISTEMAS 1985; RIBEIRO DE SOUSA et al 1985a; RIBEIRO DE SOUSA et al 1985b) e Sintra (HIDROSISTEMAS 1985; RIBEIRO DE SOUSA et al 1986 a e b), as redes de distribuição de água ao território de Macau e à cidade de Castelo Branco e o sistema da rede de distribuição de água à cidade de Lisboa de Campo de

SIMULAÇÃO DINÂMICA DE SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA
 PROGRAMA SIDIGRA/MICRO

ESQUEMATIZAÇÃO COMPLETA (COTAS PIEZOMÉTRICAS)

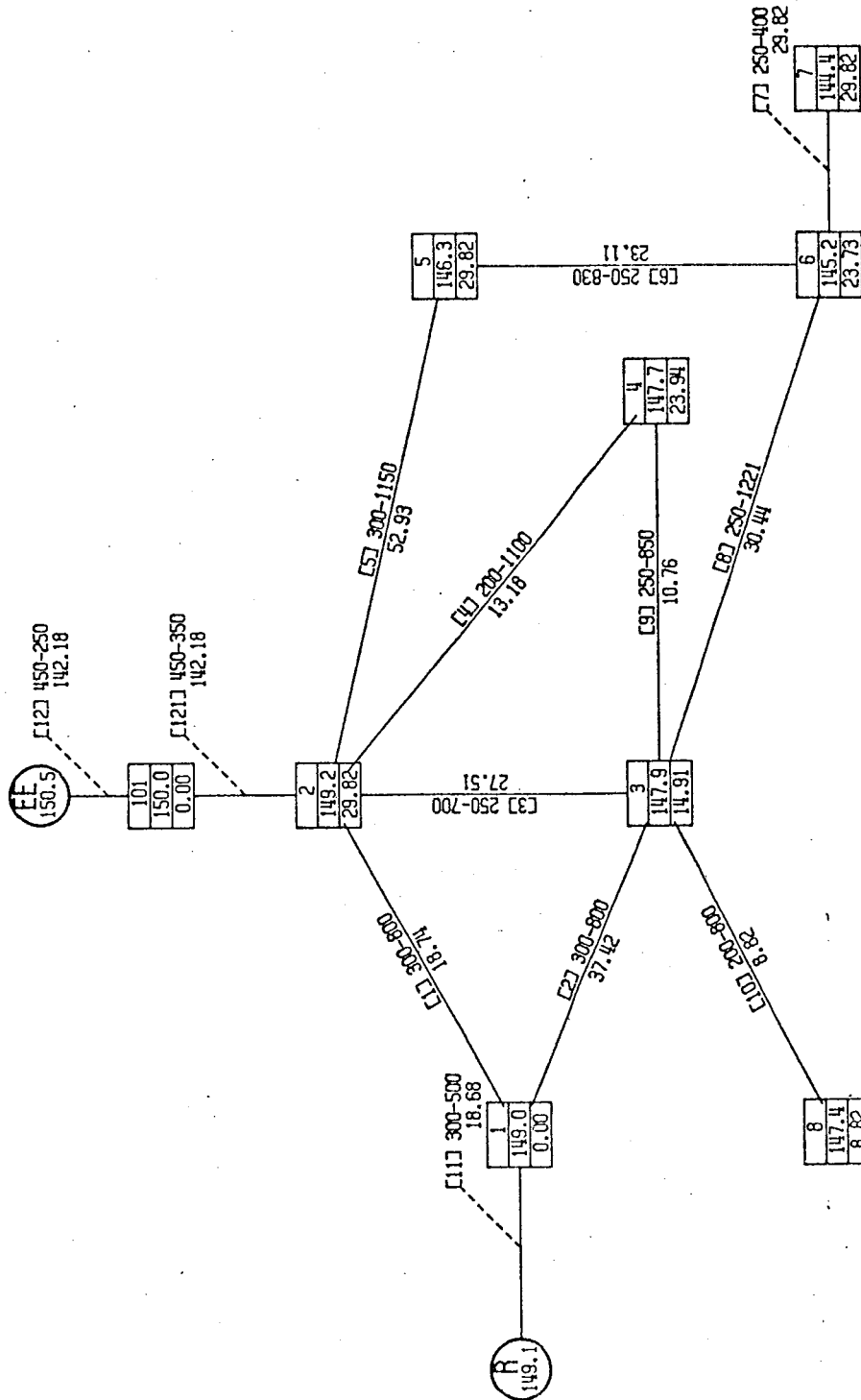


Figura 1 - Exemplo de uma esquematização completa e das correspondentes isolinhas de cotas piezométricas obtidas pelo programa SIDIGRA/MICRO.

SIMULACAO DINAMICA DE SISTEMAS DE DISTRIBUICAO DE AGUA
PROGRAMA SIDIGRA/MICRO
ISOLINHAS DE COTAS PIEZOMETRICAS

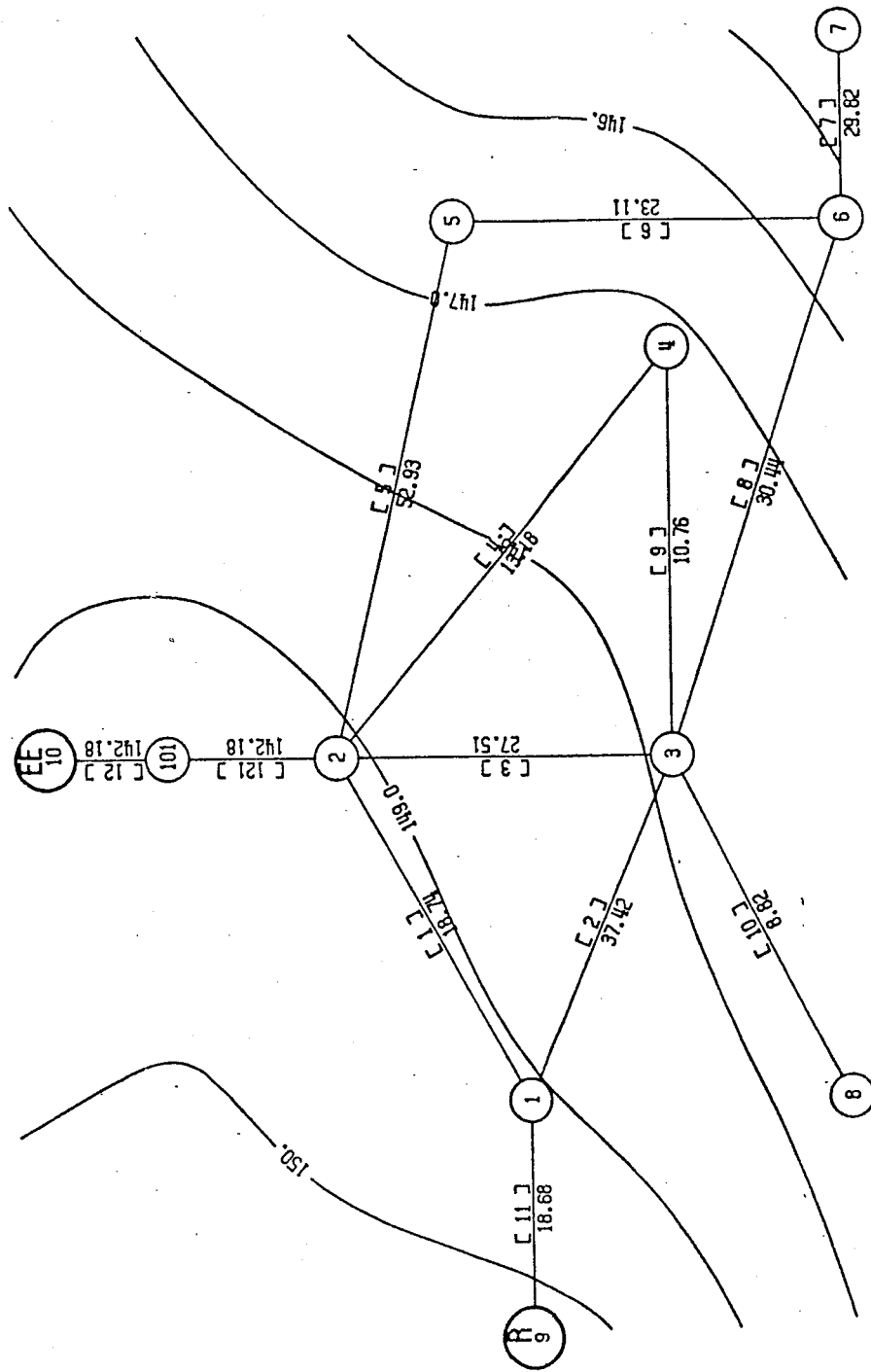


Figura 1 - Exemplo de uma esquematização completa e das correspondentes isolinhas de cotas piezométricas obtidas pelo programa SIDIGRA/MICRO (Cont.).

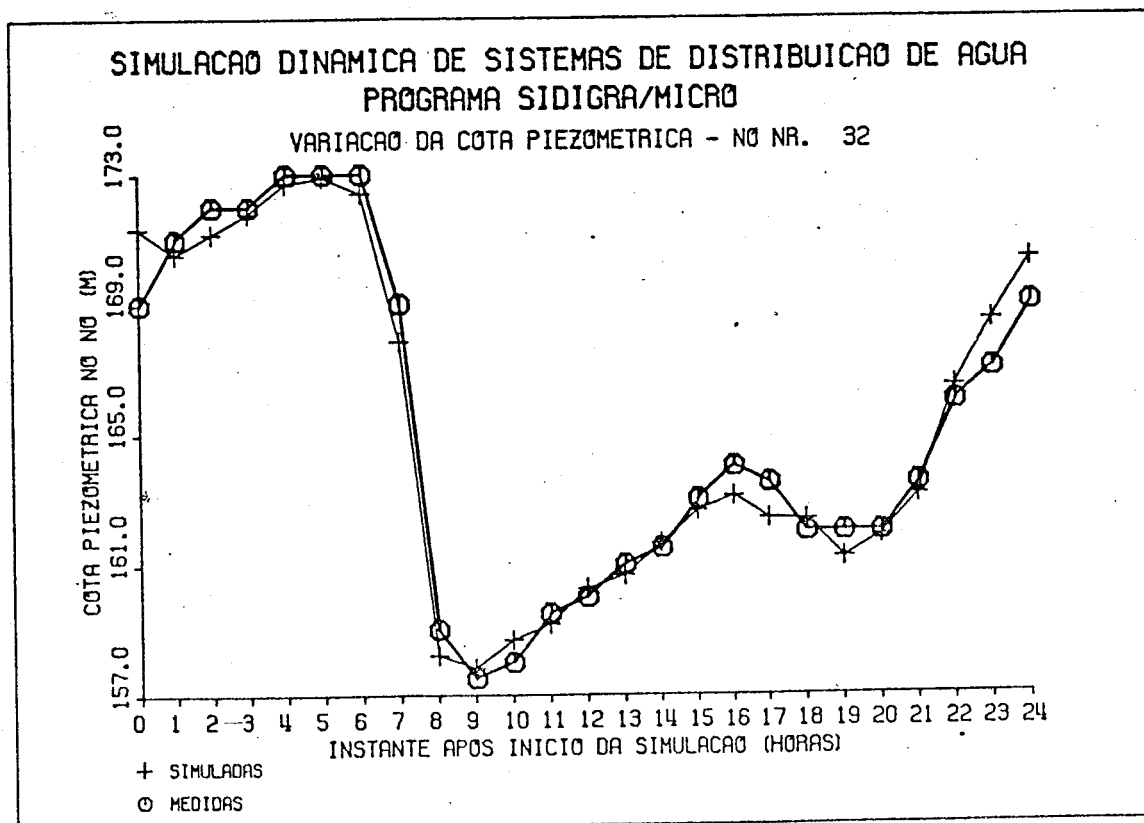
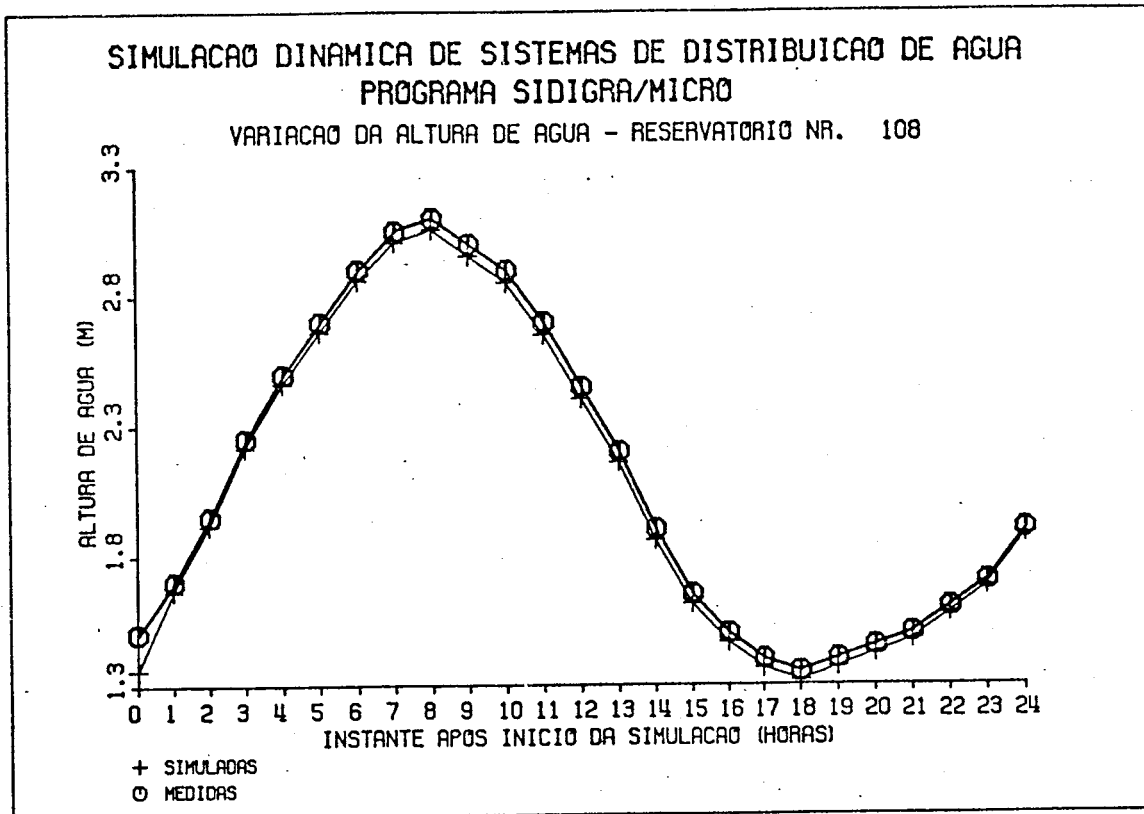


Figura 2 - Exemplo das flutuações do nível de água num reservatório e da cota piezométrica num nó obtidos pelo programa SIDIGRA/MICRO.

Ourique-Monsanto (incluído na zona superior), já referido.

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] - RIBEIRO DE SOUSA, E.A.; COSTA, A.J.P. 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.
- [5] - RIBEIRO DE SOUSA, E.A. 1984a - *Simulação de Sistemas de Distribuição de Água: Situação Actual e Perspectivas para Portugal*. Simpósio Luso-Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental - Tema Sistemas de Produção e Distribuição de Água. Lisboa.
- [6] - RIBEIRO DE SOUSA, E.A. 1984b - *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.
- [7] - RIBEIRO DE SOUSA, E.A. 1984c - *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.
- [8] - RIBEIRO DE SOUSA, E.A.; LAGES, U.; SALSINHA, J.C.; VIDEIRA, A. 1985a - *Modelo Matemático de Planeamento e Exploração do Sistema de Abastecimento de Água ao Concelho de Cascais - Parte A*. 2ªs. Jornadas Técnicas da APRH. Estoril.

- [9] - RIBEIRO DE SOUSA, E.A.; LAGES, U.; SALSINHA, J.C.; VIDEIRA, A. 1985b - *Modelo Matemático de Planeamento e Exploração do Sistema de Abastecimento de Água ao Concelho de Cascais - Parte B. 2ªs. Jornadas Técnicas da APRH. Estoril.*
- [10] - HIDROPROJECTO/HIDROSISTEMAS 1985 - *Estudo para Implementação do Modelo Matemático do Sistema de Abastecimento de Água ao Concelho de Cascais. Volumes 1 e 2 (Serviços Municipalizados de Água e Saneamento de Cascais). Lisboa.*
- [11] - HIDROSISTEMAS 1985 - *Implementação de Modelos Computacionais para Apoio ao Planeamento e Exploração Dinâmica do Sistema de Distribuição de Água ao Concelho de Sintra. Volumes 1 e 2 (Serviços Municipalizados de Água e Saneamento de Sintra). Lisboa.*
- [12] - RIBEIRO DE SOUSA, E.A.; LAGES, U. 1986a - *Modelo Computacional de Planeamento e Exploração do Sistema de Distribuição de Água ao Concelho de Sintra - Parte A. II Simpósio Luso-Brasileiro sobre Hidráulica e Recursos Hídricos - Tema Modelação Matemática e Física em Hidráulica. Lisboa.*
- [13] - RIBEIRO DE SOUSA, E.A.; LAGES, U. 1986b - *Modelo Computacional de Planeamento e Exploração do Sistema de Distribuição de Água ao Concelho de Sintra - Parte B. II Simpósio Luso-Brasileiro sobre Hidráulica e Recursos Hídricos - Tema Modelação Matemática e Física em Hidráulica. Lisboa.*
- [14] - HIDROSISTEMAS 1986 - *Estudo de Protecção Contra Choque Hidráulico de Condu^{tas} Elevatórias do Sistema de Distribuição de Água de Lisboa. Sistema Cam^{po} de Ourique-Monsanto. Volumes 1 e 2 (Empresa Pública das Águas Livres - EPAL). Lisboa.*