

IV JORNADAS TÉCNICAS DA APRH
2o. ENCONTRO NACIONAL DOS DISTRIBUIDORES DE AGUA
PLANEAMENTO DOS SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO
TRANSITÓRIOS HIDRAULICOS EM SISTEMAS DE CONDUTAS

A. BETAMIO DE ALMEIDA

Prof. Associado, Eng. Civil (IST), Consultor (Hidroquatro), Lisboa, Portugal

EDUARDO RIBEIRO DE SOUSA

Prof. Associado, Eng. Civil (IST), Consultor (Hidroquatro), Lisboa, Portugal

A. JORGE PEREIRA

Eng. Civil (U. Coimbra), Mestre em Hidráulica e Recursos Hídricos (IST)

RESUMO

O tradicional cálculo do equilíbrio hidráulico dos sistemas complexos de distribuição de água tende, cada vez mais, a ser superado pela necessidade de análises mais sofisticadas e completas. Com o auxílio do computador digital passou a ser possível alargar os cálculos em regime permanente correspondentes a um número muito limitado de situações estáticas para a execução de simulações de situações dinâmicas em regime variável ou transitório. Esta tendência pode ser orientada em duas vias complementares: 1) a análise de regimes rapidamente variáveis no tempo, tendo em vista o estudo das condições de segurança do sistema; 2) e análise de regimes gradualmente variáveis no tempo tendo em vista o estudo das condições de exploração otimizada do sistema, eventualmente em conjugação com um sistema automatizado de decisão apoiada na modelação matemática. A presente comunicação refere-se, fundamentalmente, ao primeiro caso e, em particular, assinala a execução de um estudo concreto de amplitude invulgar.

1 - INTRODUÇÃO

A necessidade de executar a análise de regimes hidráulicos e, em particular, do golpe de aríete em condutas elevatórias ou adutoras é, em geral, reconhecida no caso de condutas únicas ou em sistemas relativamente simples. Em sistemas de distribuição de água, ramificados ou malhados, este tipo de análise não é, em geral, executado. Para esta situação podem encontrar-se duas justificações: 1) a grande complexidade dos cálculos envolvidos; 2) a convicção de que os sistemas complexos tendem a acelerar o amortecimento dos transitórios e a provocar a atenuação das amplitudes máximas da variação de pressão. Em termos gerais, estas justificações possuem alguma base de verdade mas tendem a perder importância.

Com os métodos de cálculo tradicionais (gráficos ou algébricos), a análise dos transitórios, ou mesmo só do golpe de aríete, num sistema complexo de condutas envolvia uma tão grande quantidade de dados e de operações que se tornava fisicamente impossível a execução prática e útil de tal análise. Por seu turno, mesmo em casos simples, as aproximações admitidas e a acumulação de erros tornavam pouco seguros os resultados obtidos.

A aplicação do computador e de métodos de cálculo, baseados nas equações fundamentais da hidrodinâmica e em técnicas gerais de resolução, veio possibilitar o alargamento do âmbito de intervenção do especialista em transitórios hidráulicos. Em ALMEIDA e PINTO, 1981 pode encontrar-se uma das primeiras referências em Portugal a um estudo de transitórios em sistemas ramificados. Recentemente, o fácil acesso a pequenos computadores mas com elevada capacidade permitiu o desenvolvimento de programas de cálculo adequados ao tratamento dos dados e à execução dos cálculos envolvidos em sistemas com elevado número de condutas e de secções de cálculo, como são as redes de distribuição de água em meios urbanos relativamente importantes.

Subsistem, no entanto, ainda algumas dificuldades na execução de simulações numéricas relativas a sistemas de distribuição muito extensos e complexos como são os que existem nas grandes cidades, em particular no caso de os mesmos já estarem em serviço e não serem recentes. De entre estas dificuldades salientam-se as referentes à calibração e validação do modelo matemático, à determinação das condições iniciais de equilíbrio hidráulico e à caracterização de determinadas condições de fronteira específicas.

Os autores da presente comunicação têm vindo a dedicar-se a este assunto quer do ponto de vista teórico e académico quer pela necessidade de resolução de casos práticos. De entre estes destaca-se o estudo concluído recentemente (1986) para a Empresa Pública das Águas Livres (EPAL), relativo à protecção contra o choque hidráulico (golpe de aríete) da quase totalidade do sistema de distribuição de água da cidade de Lisboa, Portugal (Figura 1). A presente comunicação baseia-se, fundamentalmente, nesta experiência e neste caso estudado.

2 - METODOLOGIA GERAL

2.1 - Objectivos do estudo

A análise dos transitórios hidráulicos tem os seguintes objectivos directos:

- execução de simulações, em modelo matemático, de regimes transitórios correspondentes à saída de grupos electrobomba, a partir de condições de

funcionamento do sistema consideradas críticas, tendo em vista a determinação das pressões externas (máximas e mínimas) ao longo das condutas principais do sistema;

- avaliação de eventuais riscos de rotura das condutas e elaboração de propostas para a protecção do sistema.

A aplicação da técnica de modelação matemática de um sistema de distribuição de água conduz, em geral, à prossecução de outros objectivos de forma indirecta, em particular no caso de o sistema não ser novo. Com efeito, a caracterização matemática do sistema exige a obtenção de elementos de base suficientes para permitir uma esquematização topológica coerente e adequada e para possibilitar a execução dos cálculos necessários ao estabelecimento das condições iniciais. Estas condições iniciais correspondem às condições do escoamento existentes ao longo de todas as condutas do sistema no instante imediatamente anterior à saída de serviço dos grupos. Estas condições dizem, fundamentalmente, respeito aos valores dos caudais e das cotas piezométricas os quais podem ser obtidos por via de cálculos de equilíbrio hidráulico. Para a execução destes cálculos torna-se necessário conhecer, entre outras, as características geométricas e hidráulicas das respectivas condutas, das das estações elevatórias e dos respectivos grupos, dos reservatórios e, finalmente, dos consumos ao longo das condutas. Nesta conformidade, o estabelecimento das condições iniciais, não obstante ser uma fase preparatória da execução das simulações em regime transitório, fornece elementos importantes sobre o estado actual do sistema e sobre eventuais anomalias as quais, sem uma análise global e rigorosa, dificilmente poderiam ser detectadas.

Por seu turno, a calibração e a exploração dos modelos matemáticos, permitem a obtenção de informações, compiladas, condensadas e apresentadas por via automática, que, por si só, podem constituir benefícios apreciáveis à entidade exploradora do sistema.

2.2 - Metodologia geral seguida no estudo

Na análise do caso estudado seguiu-se a seguinte metodologia geral (Figura 2):

- 1 - Recolha, análise e selecção dos elementos de base que foi possível obter referentes ao sistema em estudo;
- 2 - Caracterização topológica do sistema: selecção das condutas a considerar na modelação matemática e das condições de fronteira;
- 3 - Execução e interpretação dos ensaios de campo (quando realizados) e dos respectivos registos e resultados;
- 4 - Calibração do(s) modelo(s) de equilíbrio hidráulico para obtenção das condições iniciais (modelos SIDINA e REDMAR);
- 5 - Implementação do modelo de simulação dos regimes transitórios (modelo SIREP);
- 6 - Execução das simulações dos regimes transitórios, análise dos respectivos resultados e elaboração de propostas.

HORIZONTE FÍSICO

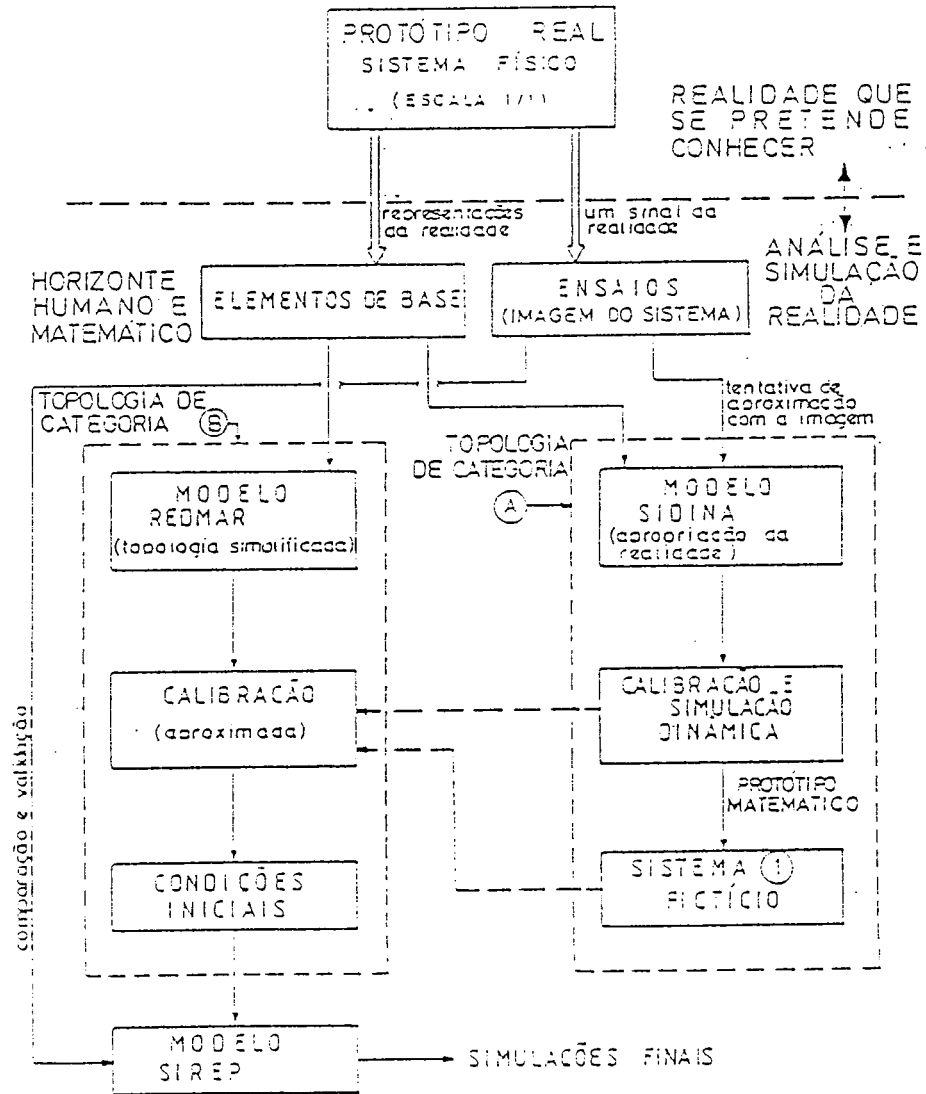


Figura 2 - Apresentação esquemática da metodologia geral adoptada no estudo.

Os ensaios em campo, que foram realizados numa parte do sistema em estudo, permitiram recolher informações sobre os consumos na rede e calibrar, de modo aproximado, os modelos matemáticos utilizados.

2.3 - Análise do cadastro e esquematização do sistema

Para a realização do presente estudo, foi fornecido pela EPAL o cadastro do sistema de abastecimento de água à cidade de Lisboa. O cadastro do sistema é constituído por um conjunto de plantas à escala 1/2000, nas quais se encontram indicados os seguintes elementos:

- a) Traçado, diâmetro e natureza do material das tubagens;
- b) Localização dos reservatórios e estações elevatórias;
- c) Localização das diversas válvulas de seccionamento das tubagens e respectiva situação operacional;
- d) Indicação da zona a que pertencem as tubagens (Zona Baixa, Média, Alta ou Superior).

Da análise do cadastro foi possível concluir que se tratava de um elemento de base bastante completo e actualizado o qual não ofereceu limitações ao grau de detalhe que se pretendeu incluir na esquematização.

A esquematização da rede foi feita de acordo com as seguintes orientações gerais:

- não inclusão no modelo de tubagens com diâmetros inferiores a 125 mm;
- não inclusão de tubagens que, pela sua distância em relação às condutas principais, sofrem perturbações de pequena importância quando se desencadeia um regime transitório;
- localização de nós de consumo nas zonas de maior concentração populacional.

Definida a esquematização do sistema, foram preparados e criados ficheiros topológicos principais dos nós e das tubagens as quais constituíram a base de preparação dos ficheiros de dados para proceder à simulação das condições de equilíbrio hidráulico iniciais.

2.4 - Análise dos dados sobre consumos

A análise dos dados sobre consumos e os critérios a adoptar para a sua atribuição aos nós têm em vista a definição dos caudais a considerar na simulação das condições de funcionamento hidráulico do sistema em estudo e constitui uma tarefa fundamental, não obstante ser muito morosa como é usual em estudos com estas características.

A metodologia a seguir numa actividade deste tipo depende, essencialmente, da qualidade e natureza dos dados disponíveis, que, no caso presente, foram os seguintes:

- a) roteiro constituído por todos os arruamentos, com indicação nas cartas à escala 1:2000 e da zona que alimenta o arruamento ordenado por ordem alfabética dos nomes;
- b) listagem, em papel, idêntica à anterior mas com ordenação crescente dos números dos arruamentos;
- c) registo magnético em disco dos consumos mensais, relativos ao período de Janeiro a Dezembro de 1985, para cada consumidor.

Em face dos dados disponíveis, foi seguida a metodologia representada através do fluxograma sumário que se apresenta na Figura 3. O desenvolvimento e implementação desta metodologia só foi possível por se dispor dos registos, em disco, dos consumos bimensais por consumidor cedidos pela EPAL.

A metodologia seguida pode ser agrupada em duas etapas operacionais distintas. A primeira, está directamente ligada com o cadastro do sistema e com o roteiro e é, fundamentalmente, uma actividade não informatizada que passa pela identificação dos arruamentos que fazem parte do sistema a estudar e pela sua distribuição pelos nós de consumo. A segunda etapa é realizada com base nos registos magnéticos em disco dos consumos bimensais por consumidor e num conjunto de programas especialmente desenvolvidos, genericamente designado por PROCON, destinando-se fundamentalmente à criação do ficheiro dos consumos médios nos nós do sistema, a ser utilizado na preparação do ficheiro dos dados de entrada do programa de cálculo principal.

2.5 - Ensaio de campo de longa duração

Num sub-sistema da rede em estudo (Campo de Ourique-Monsanto) foi possível realizar ensaios de campo de longa duração (24 horas) tendo em vista a calibração aproximada dos modelos matemáticos, em particular dos modelos para cálculo do equilíbrio hidráulico inicial.

Os elementos recolhidos durante os ensaios de campo exigiram que o cálculo de equilíbrio hidráulico fossem desdobrados em duas categorias (Figura 2):

- Categoria A, com uma topologia mais próxima da topologia real e fazendo uso de um modelo avançado para obtenção de sucessivos cálculos de equilíbrio hidráulico num período de tempo muito longo (simulação dinâmica) tendo em vista possibilitar a calibração dos modelos e a obtenção, por via indirecta, dos consumos e dos caudais correspondentes às condições iniciais. Nestas simulações foi utilizado o modelo SIDINA.

- Categoria B, com uma topologia mais simplificada e igual à utilizada nas simulações de regimes transitórios, tendo em vista a obtenção directa das condições iniciais nas secções de cálculo do modelo de simulação de regimes transitórios SIREP. Nestas simulações foi utilizado o modelo REDMAR.

Os cálculos e a topologia da categoria A permitiram a simulação do funcionamento do sistema durante um período de tempo compatível com o dos registos dos ensaios (24 horas) e assim proceder à taragem dos parâmetros (e. g. rugosidade, consumos, etc.) por forma a aproximar, tanto quanto possível, as evoluções das pressões (nas secções onde foram colocados os manómetros e se obtiveram registos de pressão) e dos níveis nos reservatórios, obtidos por simulação, com os valores registados durante os ensaios.

A simulação dos regimes transitórios exige passos de cálculo no tempo (Δt) e no espaço (Δx) muito mais pequenos que os exigidos pelos cálculos de equilíbrio hidráulico em regime permanente. Por seu turno, as condutas mais afastadas da origem da perturbação (neste caso a E.E. de Campo de Ourique) e as condutas de menor diâmetro deixam de ter importância prática nos resultados exigindo, em contrapartida, aumentos muito relevantes, quer em tempo de preparação de dados, quer em tempo de cálculo no computador. Nesta conformidade, houve que preparar um esquema topológico mais simplificado o

qual foi objecto das análises em regime permanente de categoria B para obtenção das condições iniciais directamente aplicáveis no modelo SIREP.

Na Figura 2 apresenta-se de forma esquemática a metodologia geral seguida na presente análise. A descrição dos ensaios de campo de longa duração e da respectiva interpretação encontram-se em SOUSA e ALMEIDA, 1986.

2.6 - Ensaios de campo de curta duração

No sub-sistema referido no número anterior foram também executados ensaios de campo de curta duração tendo em vista a calibração e a validação do modelo matemático para análise de regimes transitórios em redes SIREP. Nestes ensaios utilizaram-se quinze manómetros registadores cuja colocação obedeceu aos seguintes quatro critérios orientadores: 1) em secções consideradas cruciais; 2) em condutas principais da rede; 3) em pontos que cobrissem de modo aproximado a área abrangida pelos ensaios; 4) na fronteira de zonas que não fossem consideradas na simulação dos transitórios hidráulicos.

Os ensaios de curta duração consistiram, basicamente, na medição e registo contínuo das variações de pressão provocadas por saída e entrada em serviço de um dos grupos da E.E. de Campo de Ourique em duas condições de consumo diferentes: situação diurna e situação nocturna. Obtiveram-se igualmente informações importantes respeitantes a variações de nível nos reservatórios, ao caudal e à altura de elevação nas bombas.

3 - SIMULAÇÃO DOS TRANSITÓRIOS HIDRAULICOS

3.1 - Modelo matemático

O modelo matemático para simulação de transitórios hidráulicos utilizado no presente estudo, modelo SIREP, foi desenvolvido tendo em vista a sua aplicação a sistemas ramificados e/ou malhados de condutas, dotados ou não de dispositivos de protecção contra efeitos do golpe de aríete.

A utilização deste modelo matemático exige o conhecimento prévio do regime permanente inicial. Quando este não é conhecido o modelo pode também ser utilizado para o estabelecimento desse regime inicial. No presente estudo, o regime inicial, conforme já foi referido, foi estabelecido com o modelo SIDINA. Na elaboração do modelo SIREP, admitiram-se as seguintes hipóteses fundamentais:

- a água e o material da conduta comportam-se de uma forma elástica e linear durante o regime variável;

- a velocidade do escoamento é sempre muito inferior à celeridade das ondas elásticas;

- a distribuição da velocidade em cada secção e em cada instante pode ser considerada como uniforme;

- as perdas de carga em regime variável dependem da velocidade do escoamento de forma idêntica à que se verifica em regime permanente.

As equações básicas diferenciais do regime variável em pressão, válidas para um troço de conduta uniforme, são as seguintes (Anexo): 1) Equação da continuidade; 2) Equação da dinâmica. A integração das equações básicas é

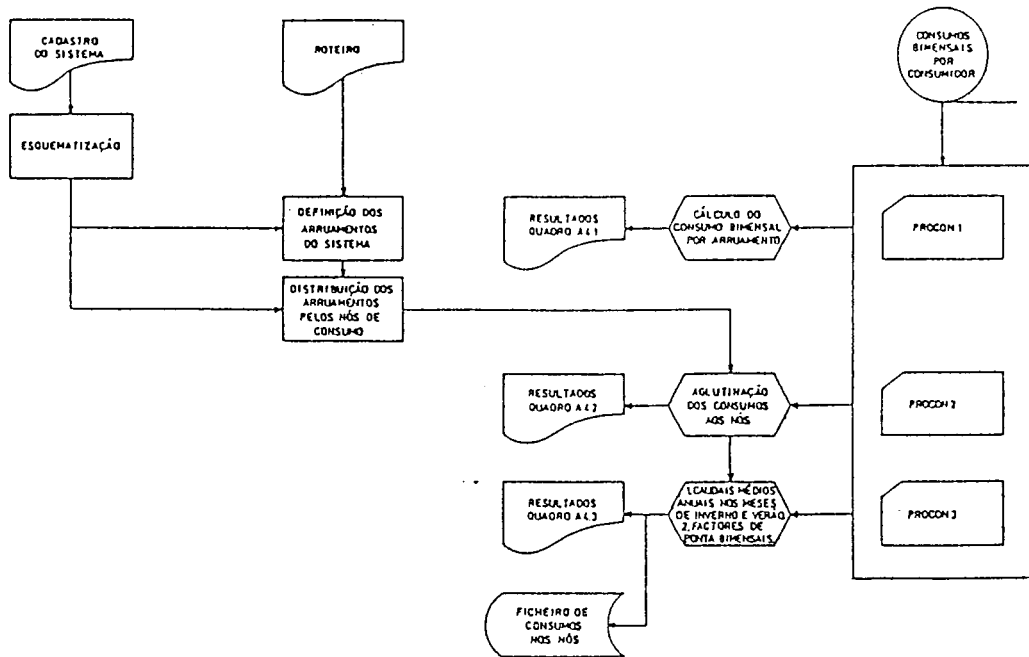


Figura 3 - Apresentação esquemática da metodologia adoptada na análise dos consumos.

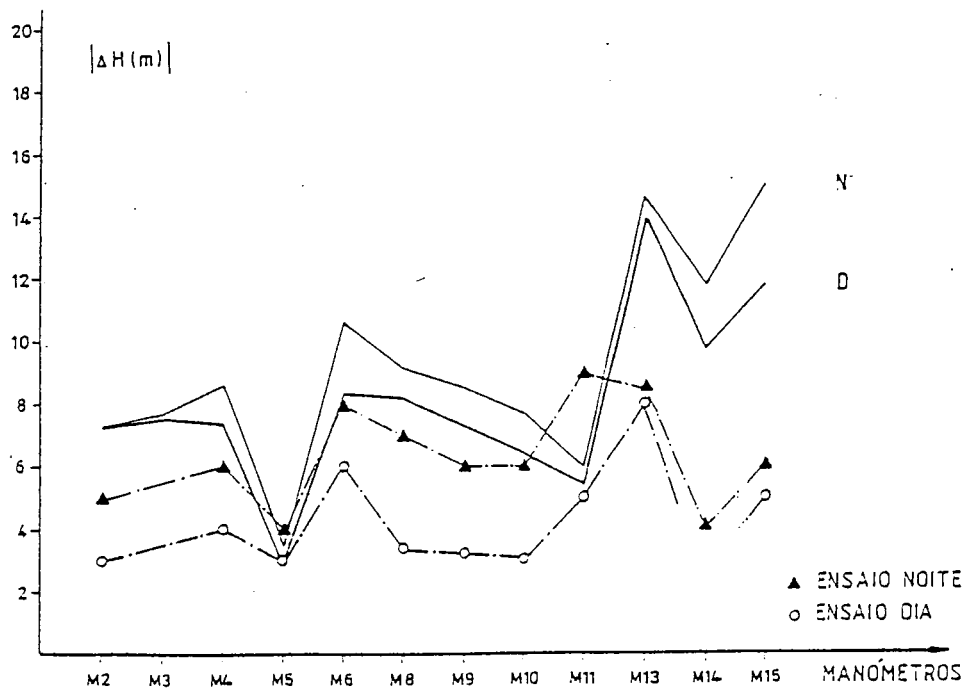


Figura 4 - Exemplo de comparação entre variações de cota piezométrica (máximos abaixamentos) calculadas e registadas nos ensaios de curta duração (transitórios).

levada a cabo pelo método das características com intervalos de tempo pré-fixados.

Na simulação dos regimes transitórios foram utilizadas condições de fronteira internas e de extremidade. As condições de fronteira internas referem-se aos nós internos, de ligação de várias condutas. As condições de fronteira de extremidade referem-se às ligações de extremidade das condutas aos órgãos hidráulicos do sistema. Estas condições de fronteira podem, eventualmente, corresponder a situações especiais, como é o caso da condição de não reflexão das ondas elásticas de pressão.

A topologia adoptada contemplou a existência de determinadas condutas de extremidade que permitiram a consideração de consumos em nós do sistema. Na extremidade de cada uma dessas condutas foi considerada uma condição de não reflexão das ondas elásticas de pressão. Aquelas condutas, dotadas da condição de fronteira referida, representam as partes da rede de distribuição que não constam no esquema topológico adoptado.

A condição de não reflexão, deduzida pelo primeiro autor num trabalho de investigação teórico executado para a EPAL anteriormente à realização do caso prático estudado, permite a não consideração de zonas secundárias da rede, pouco relevantes para a caracterização do comportamento global da rede principal de distribuição durante os regimes transitórios. As restantes condições de fronteira mais utilizadas foram as seguintes: grupos electrobomba; reservatórios com superfície livre; reservatórios de ar comprimido e válvulas.

O modelo SIREP permite a caracterização de sistemas ramificados ou malhados com elevado número de condutas e de secções de cálculo.

3.2 - Condições e características das simulações

Nas simulações efectuadas com o modelo SIREP adoptou-se um passo de cálculo Δt da ordem de 0.07 s. O comprimento mínimo dos trechos de cálculo Δx foi de 70 m. O valor máximo de Δx chegou a atingir em algumas zonas 3300 m. As celeridades adoptadas são da ordem de 900 a 1000 m/s.

A caracterização total do sistema de distribuição de Lisboa, objecto do estudo em causa, para aplicação do modelo SIREP compreendeu a consideração de 329 tubagens com diâmetros compreendidos entre 1500 mm e 150 mm e 1025 secções de cálculo correspondentes a cerca de 60000 m de comprimento total de cálculo. Na aplicação dos modelos de equilíbrio hidráulico o número total de tubagens considerado na determinação das condições iniciais foi largamente superior. A área abrangida pela rede estudada é cerca de 70 km².

A zona modelada envolveu 10 grandes reservatórios e quatro estações elevatórias (Campo de Ourique, S. Jerónimo, Barbadinhos e Olivais), tendo sido consideradas 26 bombas centrífugas.

As simulações numéricas dos transitórios corresponderam à saída de serviço dos grupos electrobomba em funcionamento em cada uma das seguintes estações elevatórias: Campo de Ourique, Barbadinhos, Olivais e S. Jerónimo. Foram consideradas, em geral, duas condições iniciais de exploração: 1) condição diurna, caracterizada por o consumo ser igual ao dobro do consumo médio anual calculado; 2) condição nocturna, caracterizada por o consumo ser igual a metade do consumo médio anual calculado. Em algumas simulações foi

também considerada uma condição excepcional.

3.3 - Validação do modelo SIREP

O modelo SIREP e outros modelos semelhantes têm sido utilizados pelos autores na simulação e análise de transitórios hidráulicos em diferentes sistemas de maior ou menor complexidade (ALMEIDA e PINTO, 1986), com resultados satisfatórios, havendo mesmo, em alguns casos, comparações com ensaios em protótipo. No caso em estudo, objecto da presente comunicação, considerou-se, contudo, ser aconselhável aproveitar os ensaios de campo realizados para calibrar e validar o modelo. Os ensaios de longa duração permitem obter aproximações dos coeficientes de perda de carga ao longo das tubagens e algumas informações sobre o consumo na rede. A reprodução em computador das condições exactas em que estes ensaios foram realizados exigiria o conhecimento de um número maior de dados e de parâmetros (nomeadamente respeitantes às bombas e aos caudais) relativamente a aquele que foi possível obter. Por seu turno, os manómetros utilizados, a respectiva montagem e o eventual efeito de ar acumulado não garantiram uma fidelidade total aos valores registados durante os regimes transitórios.

Na Figura 4 mostra-se, a título de exemplo, uma comparação entre as pressões mínimas calculadas (N para a condição nocturna e D para a condição diurna) e os valores registados em catorze dos manómetros utilizados nos ensaios.

Pode concluir-se que os valores simulados para as pressões mínimas tendem a ser superiores aos registados. As diferenças encontradas são, contudo, relativamente pequenas: da ordem de 1 a 4 m c.a. na maioria dos manómetros. As diferenças são maiores para o ensaio diurno. A quase totalidade das discrepâncias puderam ser explicadas ou compreendidas. No que respeita as pressões máximas a concordância foi quase total.

Atendendo aos condicionalismos, foi considerado que o modelo poderia ser aplicado no cálculo das pressões externas no restante sistema e para as condições consideradas mais desfavoráveis.

3.4 - Resultados obtidos

Os resultados obtidos das simulações de regimes transitórios são de dois tipos: 1) envolventes das cotas piezométricas (valores máximos e mínimos) ao longo das tubagens; 2) figuras traçadas pelo computador respeitantes à evolução no tempo das cotas piezométricas (H) e dos caudais (Q) em secções de cálculo escolhidas. Atendendo ao elevado número de tubagens e de secções de cálculo, houve que desenvolver programas especiais para tratamento da informação. A título de exemplo, mostra-se na Figura 5 a variação de caudal numa secção de cálculo, após a saída de serviço das bombas numa estação elevatória da zona, com inversão do sentido do escoamento final (a secção passou a ser alimentada por via gravítica por um reservatório. Na Figura 6 indica-se a correspondente variação da cota piezométrica. Na Figura 7 apresenta-se uma saída típica de resultados na impressora e na Figura 8 um exemplo do traçado das envolventes das cotas piezométricas numa das tubagens.

A análise crítica dos resultados incidiu, fundamentalmente, nos seguintes dois aspectos: 1) análise comparativa dos resultados nas condições diurna e nocturna de funcionamento; 2) análise global em função da eventual necessidade de protecções contra o efeito do golpe de arfete. A avaliação do risco a que

EVOLUÇÃO DOS CAUDAIS NO TEMPO

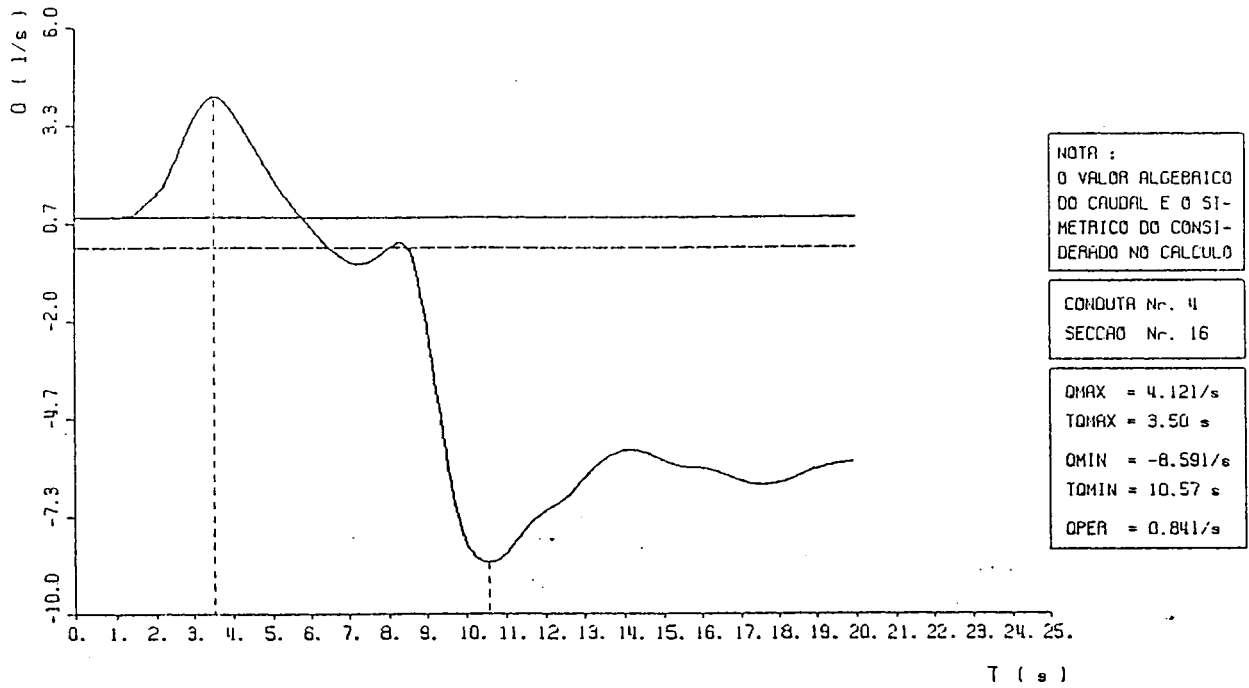


Figura 5 - Exemplo de saída gráfica de resultados: variação de caudal numa secção de cálculo.

EVOLUÇÃO DAS COTAS PIEZOMÉTRICAS NO TEMPO

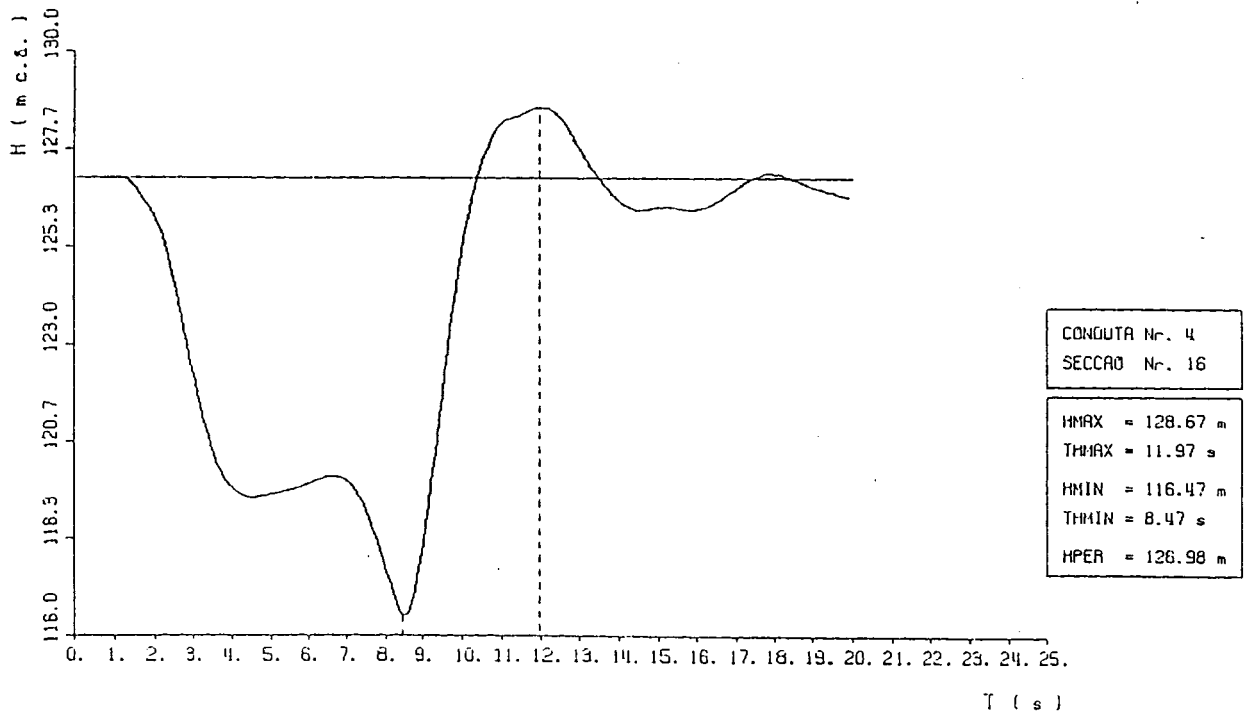


Figura 6 - Exemplo de saída gráfica de resultados: variação da cota piezométrica numa secção de cálculo.

ENVOLVERIES DE GOMAS PIEZOM. E. PRESSOES

CONDUTA	SECCAO	COTA TOPOG.	H INIC.	H NIH	H MAX	P NIH	P MAX	CH MAX -H MIN	CH MAX -H INIC.	CH INIC. -H MIN
		(M)	(MG.A.)	(MG.A.)	(MG.A.)	(MG.A.)	(MG.A.)	(MG.A.)	(MG.A.)	(MG.A.)
1	1	122.50	126.40	126.40	126.40	3.50	3.50	0.0	0.0	0.0
2	2	118.20	126.50	124.83	126.76	6.63	9.56	1.73	0.26	1.67
3	3	113.40	126.59	123.28	127.10	9.88	13.70	3.82	0.51	3.31
4	4	108.70	126.69	121.76	127.39	13.06	18.69	5.63	0.70	4.93
5	5	104.00	126.79	120.30	127.64	16.30	23.64	7.34	0.85	6.49
6	6	99.20	126.89	118.92	127.84	19.72	28.64	8.92	0.95	7.97
7	7	94.50	126.98	117.63	127.99	23.13	33.69	10.36	1.01	9.35
8	8	94.50	126.98	117.63	127.99	23.13	33.69	10.36	1.01	9.35
9	9	92.70	126.98	117.26	128.17	24.56	35.47	10.91	1.19	9.72
10	10	90.80	126.98	117.04	128.31	26.24	37.51	11.27	1.33	9.94
11	11	94.50	126.98	117.63	127.99	23.13	33.69	10.36	1.01	9.35
12	12	93.50	127.03	116.97	128.00	23.47	34.50	11.03	0.97	10.06
13	13	90.80	126.98	117.04	128.31	26.24	37.51	11.27	1.33	9.74
14	14	87.20	126.98	116.87	128.45	29.67	41.25	11.58	1.47	10.11
15	15	83.70	126.98	116.67	128.57	32.97	44.87	11.90	1.59	10.31
16	16	80.10	126.98	116.47	128.67	36.37	48.57	12.20	1.69	10.51
17	17	80.80	126.98	117.04	128.31	26.24	37.51	11.27	1.33	9.94
18	18	88.40	126.99	117.01	128.33	28.61	39.93	11.32	1.34	9.99
19	19	86.00	126.99	116.93	128.33	30.93	42.33	11.60	1.34	10.06
20	20	93.50	127.03	116.97	128.00	23.47	34.50	11.03	0.97	10.06
21	21	99.30	127.03	116.76	127.90	17.46	28.60	11.13	0.97	10.27
22	22	105.20	127.03	116.58	127.78	11.38	22.58	11.21	0.75	10.45
23	23	111.00	127.03	116.42	127.65	5.62	16.65	11.23	0.62	10.61
24	24	111.00	127.03	116.42	127.65	5.62	16.65	11.23	0.62	10.61
25	25	110.90	127.03	116.28	127.49	5.38	16.59	11.21	0.46	10.75
26	26	110.80	127.03	116.15	127.64	5.35	16.86	11.50	0.63	10.88
27	27	110.70	127.03	116.14	127.87	5.44	17.17	11.73	0.84	10.85
28	28	93.50	127.03	116.97	128.00	23.47	34.50	11.03	0.97	10.06

Figura 7 - Exemplo de saída de resultados em impressora.

estão sujeitas as condutas ficará dependente da análise das condições locais de conservação das mesmas. Os resultados poderão igualmente servir para tentar correlacionar a frequência de avarias na rede com as zonas onde as variações de pressão calculadas são mais elevadas.

Os resultados obtidos e as propostas de alteração ou de protecção do sistema de distribuição, resultantes do presente estudo, estão contidos em cerca de uma dezena de volumes e são propriedade da EPAL.

4 - CONSIDERAÇÕES FINAIS

4.1 - Estudos teóricos ou de investigação

No que concerne a problemática do amortecimento e atenuação das variações de pressão provocadas pelos transitórios num sistema de condutas ramificadas ou malhadas, não é ainda possível apresentar conclusões definitivas. Com efeito, a grande variabilidade das características topológicas e hidráulicas das redes tem como consequência a grande dificuldade em se detectarem regras gerais. Algumas conclusões parciais foram já obtidas em resultado de um estudo de investigação executado para a EPAL, ainda não publicado, o qual inclui simulações sistemáticas e a utilização de parâmetros adimensionais.

As equações básicas apresentadas em anexo podem servir de base ao cálculo dos equilíbrios hidráulicos iniciais. A utilização do mesmo modelo para cálculo dos regimes hidráulicos permanentes e transitórios e, eventualmente, para apoio a técnicas de automatização e de exploração otimizada das redes de distribuição, motivaram o estudo de técnicas numéricas especiais para minimização do tempo de convergência na obtenção de equilíbrios hidráulicos em sistemas complexos pelo método das características. O terceiro autor concluiu, no presente ano uma tese de mestrado neste domínio (PEREIRA, 1987).

4.2 - Conclusões

O caso estudado, relativo à rede de distribuição de água de Lisboa, possui características que se consideram inéditas quer no país, quer internacionalmente. Com efeito não foi encontrado na bibliografia especializada nenhum exemplo de análise de regimes transitórios abrangendo uma rede tão importante de condutas.(i)

A realização deste estudo abriu novas perspectivas à modelação matemática das redes e permitiu a aquisição de uma experiência técnica nacional neste domínio, sendo de salientar o dinamismo da EPAL ao patrocinar o mesmo. O estudo permitiu igualmente um melhor conhecimento da rede de distribuição de Lisboa e a elaboração de propostas concretas conducentes a uma melhoria no respectivo funcionamento.

5 - AGRADECIMENTOS

No estudo apresentado nesta comunicação colaboraram ainda o Eng. A. Macedo Pinto (co-autor do programa SIREP) e o Eng. Ulisses Lages da Silva, actualmente colaboradores da HIDROQUATRO, Consultores de Hidráulica, Recursos

(i) - Em comprimento total, contudo, existe um outro caso estudado que excede o referente a esta comunicação: trata-se de uma rede de "pipelines" com o comprimento máximo de 460 km que foi estudado por uma equipa coordenada pelo primeiro autor (ver ALMEIDA e PINTO, 1986).

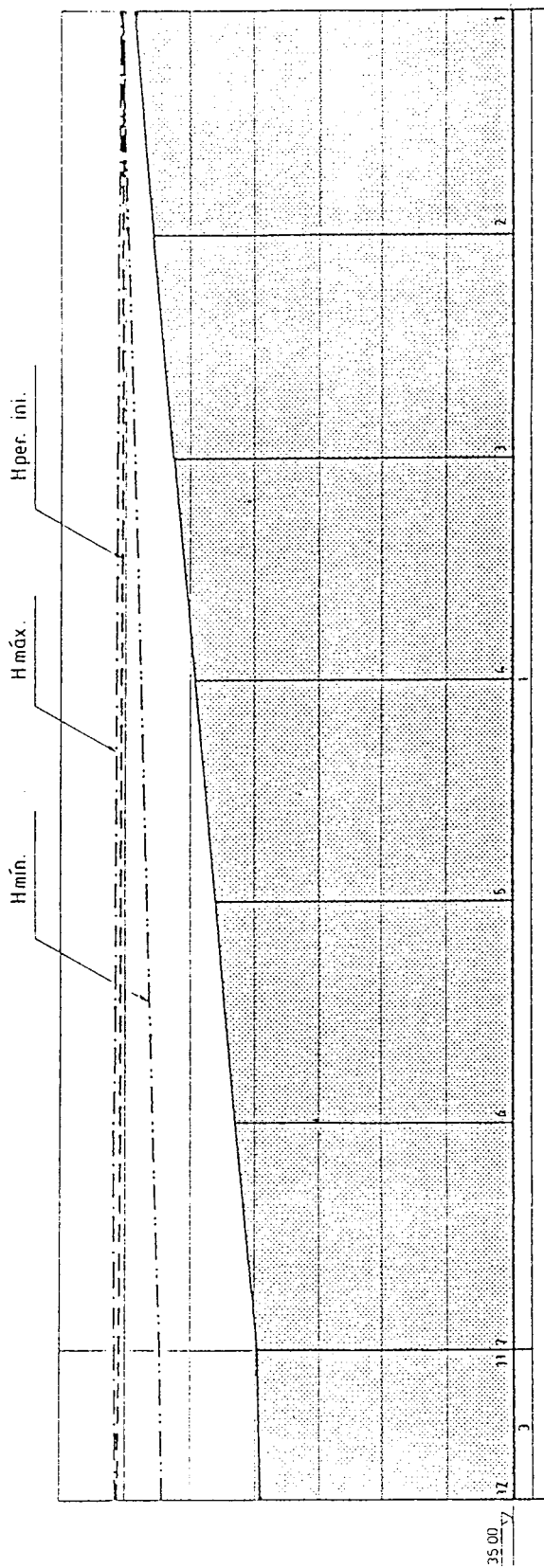


Figura 8 - Exemplo de apresentação de resultados finais.
 Envolvente de cotas piezométricas e perfil da conduta num dos trechos de cálculo do estudo

Hídricos e Ambiente, Lda.

Os autores desejam aproveitar a oportunidade para agradecer à EPAL, em particular, aos Engenheiros Ramos Motta, Gueifão de Oliveira e José Montargil (chefe do projecto em causa) o terem tornado possível o desenvolvimento deste trabalho.

6 - REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

ALMEIDA, A.B.; PINTO, A.M. - Utilização do Cálculo Automático na Análise de Regimes Transitórios em Sistemas Ramificados de Conduitas. Congresso 81 da Ordem dos Engenheiros (Tema 1), Lisboa, 1981.

ALMEIDA, A.B.; PINTO, A.M. - Regimes Transitórios em Pressão. Análise de Casos Complexos com Utilização de Modelos Matemáticos. II Simpósio Luso-Brasileiro sobre Hidráulica e Recursos Hídricos, APRH-ABRH, Lisboa, 1986.

SOUSA, E.R.; ALMEIDA, A.B. - Simulação Dinâmica do Sistema da EPAL Campo de Ourique - Monsanto da Rede de Distribuição de Água de Lisboa. 1o. Encontro Nacional dos Distribuidores de Água (Tema 3 - Sub-tema 3.4), APRH, Sintra, 1986.

PEREIRA, A.J. - Equilíbrios Hidráulicos de Sistemas pelos Métodos Estático e Elástico. Tese submetida no I.S.T. para obtenção do grau de Mestre em Hidráulica e Recursos Hídricos, Lisboa, 1987.

ANEXO - EQUAÇÕES BÁSICAS

- Equação da continuidade

$$\frac{c}{g} \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{\partial H}{\partial t} = 0 \quad (\text{A.1})$$

- Equação da dinâmica

$$g \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial t} + f V |V| / (2 D) = 0 \quad (\text{A.2})$$

sendo:

V - velocidade do escoamento em cada secção da conduta;

H - cota piezométrica em cada secção da conduta;

c - celeridade das ondas elásticas;

g - aceleração da gravidade;

f - factor de Darcy-Weisbach;

D - diâmetro interno da conduta.

A integração das equações básicas exige o conhecimento dos valores de H e V (ou Q= V x secção da conduta) em todas as secções das condutas e no instante inicial (condições iniciais) e as condições a que devem obedecer H e V nas extremidades de cada troço uniforme de conduta (condições de fronteira). A solução analítica exacta das equações (A.1) e (A.2) e das equações das condições de fronteira não é, em geral, possível de obter, tornando-se necessário recorrer a métodos de integração numérica. Presentemente, o método mais eficiente e potente de integração das equações básicas do regime variável em pressão é o método das características. É este o método que é utilizado no modelo SIREP.

Este método permite proceder à substituição do sistema de equações básicas com derivadas parciais pelo seguinte sistema de dois pares de equações totais, válidas segundo as linhas características C+ e C- do plano de cálculo (x,t):

- Segundo C⁺

$$dH + c/(g S) dQ + J dx = 0 \quad (\text{A.3})$$

$$dx = + c dt \quad (\text{A.4})$$

- Segundo C⁻

$$dH - c/(g S) dQ + J dx = 0 \quad (\text{A.5})$$

$$dx = - c dt \quad (\text{A.6})$$

As equações (A.3) a (A.6) são integradas, por via numérica e de acordo com um método explícito, ao longo das linhas características devendo a malha de cálculo obedecer à seguinte condição de estabilidade numérica:

$$x \geq c t$$

Os nós interiores (redes e malhas) são modelados a partir das seguintes equações básicas:

- Equação da continuidade no nó:

$$\sum_{l=1}^{NCK} [Q (j_n, in, t)]_K = 0$$

sendo $[Q (j_n, in, t)]_K$ o caudal na secção de extremidade in da conduta j_n que concorre no nó K, no instante t (caudal positivo se o escoamento entra no nó e negativo se sai) e NCK o número de condutas que concorrem no nó K.

- Equações características C^+ e C^- - Admitindo que a cota piezométrica instantânea é a mesma em todas as extremidades das condutas do nó, obtém-se pela conjugação das equações de continuidade e características a seguinte expressão para a cota piezométrica instantânea no nó K:

$$H (K, t) = \frac{\sum_{l=1}^{NCK} [CN \ g \ S/c]_l}{\sum_{l=1}^{NCK} [g \ S/c]_l}$$

sendo CN expressões algébricas dependentes do sentido positivo de x em cada conduta l concorrente no nó K (equações C^+ ou C^- , respectivamente).

Cada uma das condições de fronteira é caracterizada por equações matemáticas adequadas.