

ANÁLISE E SIMULAÇÃO DE REGIMES TRANSITÓRIOS EM SISTEMAS SOB PRESSÃO.

APLICAÇÃO À DETECÇÃO DE FUGAS EM CONDUTAS ELEVATÓRIAS.

João TENTÚGAL VALENTE¹; Manuel Maria PACHECO FIGUEIREDO²; Pedro LEITE³;
Eduardo VIVAS⁴

RESUMO

O presente trabalho constitui um estudo para localização da secção de uma conduta elevatória – integrada num Sistema Adutor Elevatório de Abastecimento de Água – em que ocorra uma fuga de água, aproveitando o efeito produzido pela ocorrência do fenómeno de Choque Hidráulico.

Para o estudo do comportamento da fuga e da sua influência no normal funcionamento do sistema elevatório, foi elaborado um modelo matemático baseado num algoritmo que, suportado na análise do fenómeno do Choque Hidráulico em Sistemas Adutores Elevatórios de Abastecimento de Água e na sua interpretação pelo Método das Características, permitisse estudar a resposta do sistema e ainda proceder à localização, mesmo que aproximada, de uma fuga de água.

O algoritmo foi desenvolvido com o apoio do software Matlab® e pretendeu-se que fosse de fácil percepção e execução e, ainda, aplicável a qualquer sistema elevatório que se pretenda analisar (com ou sem fuga de água).

Para se aferir da capacidade do modelo matemático desenvolvido, o trabalho foi complementado com a sua aplicação a um caso real. O modelo foi assim experimentado e calibrado, estudando o Sistema Elevatório de Vilar de Mouros, em Caminha. Para este caso, depois de calibrado o algoritmo definidor do sistema e do fenómeno de Choque Hidráulico inerente à paragem dos grupos elevatórios, foi simulada a ocorrência de uma fuga de água numa determinada secção da conduta.

A partir do modelo desenvolvido foi ainda possível proceder a tentativas de localização de fuga por métodos analíticos, ou seja, sem recurso a pesquisas locais com vista à detecção e localização da mesma.

¹ Engenheiro Civil, NORAQUA, Lda , joaovalente@noraqua.pt

² Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Civil, FEUP, mpfiguei@fe.up.pt

³ Engenheiro Civil, SMARTIVE, Lda , pedro.leite@smartive.net

⁴ Engenheiro Civil, SMARTIVE, Lda , eduardo.vivas@smartive.net

PALAVRAS-CHAVE: Sistema Adutor Elevatório de Abastecimento de Água, Pressão, Perda de Água, Fuga de Água, Choque Hidráulico, Método das Características

1. INTRODUÇÃO

O Ciclo da Água (ou Ciclo Hidrológico) contempla, nas suas diferentes etapas, processos que podem ser do foro natural ou que impliquem ou resultem da actividade e acção do Homem. O sub-ciclo do Ciclo da Água que depende mais acentuada e directamente do Homem designa-se por “Ciclo de Utilização da Água”. Das diversas fases em que se pode dividir destacam-se as relativas à “utilização” – concretizada na prática pelo funcionamento das redes de distribuição e das redes prediais e que a montante inclui a captação nas reservas naturais, o tratamento de água para a tornar compatível com as várias exigências de qualidade adequadas ao consumo e a adução aos diferentes pontos de entrega (habitualmente consubstanciados em reservatórios).

Todo o conjunto destas componentes do Ciclo de Utilização da Água constitui o designado Sistema de Abastecimento de Água onde se integra o objectivo do presente estudo, principalmente na componente da adução.

Sob o ponto de vista da adução sob pressão, esta pode ser realizada sob a forma gravítica – em condutas gravíticas ou por elevação – em condutas elevatórias. A uma adutora elevatória estará sempre associado um meio mecânico (grupos elevatórios) que permite transferir para o escoamento a energia necessária e suficiente para vencer o desnível geométrico e de perdas de energia entre as secções (normalmente reservatórios) de montante e jusante da conduta.

Em resultado do funcionamento integrado das duas principais componentes de um sistema elevatório – as condutas elevatórias e os grupos elevatórios, associam-se, muitas vezes, devido ao efeito de paragem mais ou menos rápida dos grupos elevatórios, efeitos de pressão indesejados ao longo da conduta, devido à ocorrência de um regime transitório de escoamento designado por Choque Hidráulico ou Golpe de Aríete. Este ocorre, por exemplo, devido à interrupção no fornecimento de energia eléctrica aos grupos elevatórios provocado pela acção de paragem – seja programada ou não. O fenómeno de Choque Hidráulico pode, genericamente, caracterizar-se pela ocorrência num espaço de tempo relativamente curto e ao longo de todo o sistema elevatório, de variações de pressão (positivas e negativas) e de velocidade (no sentido ascendente e descendente), com valores muito superiores aos que a conduta e seus acessórios podem estruturalmente ser capazes de suportar. Esta questão é ainda acompanhada por um outro problema essencialmente relacionado com a exploração, de fundamental importância no momento presente, que se refere à possibilidade de ocorrência de perdas de água ao longo do traçado da conduta, resultantes da existência ou ocorrência de fugas que eventualmente possam suceder. A detecção das secções ou zonas da conduta onde se verifiquem perdas de água não é simples e directa, na maior parte das situações. A menos que o “caminho “ da água seja a superfície, a detecção é um objectivo difícil.

É objectivo do presente estudo procurar encontrar uma metodologia que ajude a localizar, à custa da análise dos resultado da existência e ocorrência do fenómeno de Choque

Hidráulico, zonas ou secções onde esteja a ocorrer perda de água resultante da existência de fuga num Sistema Adutor Elevatório, recorrendo à modelação hidráulica deste fenómeno. Foi abordado também um possível mecanismo para a detecção e localização dessa mesma fuga.

2. CHOQUE HIDRÁULICO. ANÁLISE PELO MÉTODO DAS CARACTERÍSTICAS

O fenómeno de Choque Hidráulico em sistemas elevatórios corresponde à ocorrência de regimes de escoamento do tipo transitório, de características não permanentes. Caracterizam-se essencialmente por uma variabilidade de pressões e velocidades ao longo do tempo e do traçado da conduta, num intervalo de tempo muito curto.

Para as adutoras elevatórias, o choque hidráulico depende principalmente das características do ou dos grupos elevatórios escolhidos, das características de resistência da conduta e do tipo de manobra, mais concretamente da sua lei de paragem. A inércia das massas girantes tem significativa influência na magnitude do choque hidráulico decorrente da interrupção do fornecimento de energia ao grupo electrobomba.

Para o estudo e análise dos efeitos decorrentes deste fenómeno existem métodos que permitem uma abordagem simples ao estudo do choque hidráulico em condutas tanto elevatórias como gravíticas, mas apenas fornecem informação sobre uma envolvente de pressões aproximada. Trata-se de Métodos Expeditos que deverão ser utilizados numa fase de análise preliminar, e de fácil aplicação.

Para uma análise pormenorizada do Choque Hidráulico e dos seus efeitos, existem outros métodos passíveis de serem utilizados mas aquele a que mais se recorre na actualidade é o Método das Características.

O Método das Características consiste num procedimento computacional de cálculo com o objectivo de resolução das equações diferenciais do movimento e da continuidade, sob a forma numérica e de modo sistematizado, suficientemente preciso para representar e prever o fenómeno.

De acordo com Pacheco Figueiredo (1990) e (2007), a modernidade destes métodos não está somente na possibilidade de tratamento computacional, mas também no facto de ser contabilizado o efeito produzido pela perda de carga, assim como da inclinação da conduta. Este método é, então, o procedimento mais utilizado actualmente por apresentar simplicidade de utilização, em particular no tratamento de condições fronteira ao escoamento mais complexas.

A aplicação realizada pelo referido Autor, permite, assim, transformar as equações diferenciais deduzidas a partir de considerações de equilíbrio dinâmico e de conservação de massa e considerando como elemento definidor de base o esquema apresentado na Figura 1, em que as características do escoamento no ponto P são determinadas a partir das características de escoamento nos pontos imediatamente anterior e posterior, de acordo com equações lineares de aplicação directa.

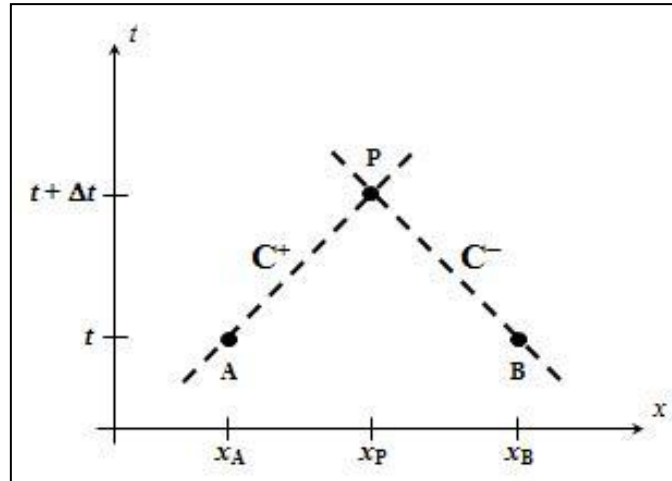


Figura 1 – Esquema representativo do significado das expressões do Método das Características

As variáveis intervenientes na figura têm os seguintes significados:

- P é o “ponto” cujas características do escoamento se pretende estudar;
- A é o “ponto” imediatamente a montante de P no instante anterior, t;
- B é o “ponto” imediatamente a jusante de P no instante anterior, t;
- t + Δt é o instante de tempo a estudar;
- Δt é o intervalo de tempo da integração numérica em ordem ao tempo;
- x_A, x_P e x_B são as posições dos pontos A, P e B, respectivamente;
- C⁺ e C⁻ correspondem às equações que caracterizam a influência do ponto anterior e posterior no escoamento no ponto P, respectivamente.

Em sequência, podem definir-se as equações do Método das Características aplicado ao fenómeno do Choque Hidráulico do seguinte modo:

$$C^+ : H_p + (A + K R_p | Q_p |) Q_p - C_A = 0 \quad (2.21)$$

$$C^- : H_p - (A + K R_p | Q_p |) Q_p - C_B = 0 \quad (2.22)$$

sendo

$$A = \frac{a}{gS} \quad (2.23)$$

$$C_A = H_A + [A - (1 - K)R_A | Q_A |] Q_A \quad (2.24)$$

$$C_B = H_B - [A - (1 - K)R_B | Q_B |] Q_B \quad (2.25)$$

em que:

- H_P , H_A e H_B é a energia do escoamento nos pontos P, A e B, respectivamente;
- Q_P , Q_A e Q_B é o caudal nos pontos P, A e B, respectivamente;
- a é a celeridade;
- K é o factor de ponderação da integração numérica em ordem à coordenada espacial x ;
- R é um coeficiente do Método das Características definido pela expressão 2.26 e que é igual para todos os pontos em estudo da conduta, quando se admite que o escoamento se dá sempre em regime turbulento rugoso:

$$R = \frac{\lambda}{2gDS^2} \Delta x \quad (2.26)$$

Por fim, para se determinar a energia do escoamento e do caudal em cada ponto P a estudar, aplicam-se as seguintes expressões:

$$H_P = \frac{C_A + C_B}{2} \quad (2.27)$$

$$Q_P = \frac{C_A - C_B}{A_1} \quad (2.28)$$

sendo

$$A_1 = A + \sqrt{A^2 + 2KR_P |C_A - C_B|} \quad (2.29)$$

Há ainda a considerar as condições fronteira do grupo elevatório e também do reservatório de jusante:

- no grupo elevatório:

$$Q_P = \frac{-(BN - A) - \sqrt{(BN - A)^2 - 4(C - KR_P)(DN^2 + Z_R - C_B)}}{2(C - KR_P)} \quad (2.30)$$

$$H_P = (A + KR_P |Q_P|)Q_P + C_B \quad (2.31)$$

em que:

- A, B e C são os parâmetros definidores da curva característica da bomba;
- N é o valor das rotações por minuto da bomba.

- no reservatório de jusante:

$$Q_P = \frac{2(C_A - Z_R)}{A_3} \quad (2.32)$$

$$H_P = -(A + KR_P |Q_P|)Q_P + C_A \quad (2.33)$$

sendo

$$A_3 = A + \sqrt{A^2 + 4(K_L + KR_P) |Z_R - C_A|} \quad (2.34)$$

2.1 Caudal de Fuga

Sendo um dos objectivos fundamentais do presente trabalho o estudo da análise e influência de uma fuga numa conduta elevatória – mesmo que simulada – no efeito do fenómeno do Choque Hidráulico que possa ocorrer, importa definir sob o ponto de vista matemático a expressão que permite quantificar o caudal escoado através da mesma.

$$Q_{fuga} = (H - Z_{fuga})^{\beta}$$

em que:

- Q_{fuga} é o caudal de fuga. Pode ser estimado pela diferença de caudais saídos do reservatório de montante e os entrados no reservatório de jusante;
- H é a energia do escoamento na secção em que se está a simular a existência de fuga;
- Z_{fuga} é a cota topográfica da secção em que se está a simular a existência de fuga;
- β é o expoente, que habitualmente tem por valor 0,5.

3. ALGORITMO DESENVOLVIDO

3.1 Considerações Gerais

Para o presente estudo, foi desenvolvido um algoritmo com o objectivo de se analisar o fenómeno do Choque Hidráulico de um modo analítico e automático.

Este algoritmo, criado em ambiente de software Matlab®, apresenta alguns pressupostos e ainda algumas limitações que se explicitam de seguida.

Como o estudo relativo ao presente trabalho incidiu sobre Sistemas de Adução Elevatórios de Abastecimento de Água, que recorrem a electrobombas para fornecer energia hidráulica ao sistema, é necessário conhecer-se algumas das características do grupo elevatório em causa, tais como:

- a equação da curva característica da(s) bomba(s) constituintes do grupo elevatório;
- a curva de rendimento do grupo elevatório;
- a inércia do grupo elevatório.

A equação da curva característica da(s) bomba(s) é essencial para o cálculo do Ponto de Funcionamento do Sistema Elevatório e depende de um estudo prévio do utilizador para definir as constantes inerentes a cada uma das características apresentadas.

Ao algoritmo é, obviamente, fundamental fornecer também as características do traçado em perfil da conduta elevatória. Habitualmente, apenas são conhecidas as características de alguns “pontos” da conduta, uma vez que se opta por fazer um levantamento topográfico de X em X metros, ou então dos “pontos característicos” do traçado em perfil (“pontos” altos ou “pontos” baixos, por exemplo). Contudo, o programa de cálculo, adopta e executa, entre quaisquer dois “pontos” introduzidos como dados ao programa, uma linearização entre os

“pontos” definidores. Tal, conduz a um pequeno erro de análise, especialmente no que concerne ao caso fenómeno do Choque Hidráulico.

O programa permite ainda, a consideração e a introdução de perdas de carga localizadas ao longo da conduta sob três formas e, se for pretendido, em simultâneo: majorando a perda de carga contínua, considerando coeficientes de perdas de carga localizadas e, ainda, adicionando uma perda de carga localizada única e total no reservatório de jusante. Cada uma destas perdas de carga será sempre estimada ou, então, para melhor aproximação, deverá ser experimentada em modelo para otimizar a definição do coeficiente de perda de carga localizada em cada uma das possíveis singularidades do sistema.

A definição da posição do Reservatório de Ar Comprimido, abreviadamente designado por RAC, ou de outro qualquer dispositivo é, possivelmente, a maior limitação do programa de cálculo desenvolvido. Pelo Método das Características e para o estudo do fenómeno do Choque Hidráulico, a conduta é dividida num determinado número de trechos pretendido. O algoritmo apenas permite que o RAC seja inserido no sistema a partir do primeiro ponto a seguir ao grupo elevatório, o que, dada a divisão da conduta, pode levar a que este órgão não seja “colocado” na posição correcta, podendo levar a alguns pequenos erros de análise devido à incorrecta distância ao grupo elevatório.

No caso de se pretender ainda estudar o caso de ocorrência de uma fuga e a sua localização, o programa, para que simule esta situação, necessita que lhe seja fornecido o valor do caudal de fuga, que pode ser obtido pela diferença entre os caudais saídos do reservatório de montante e os chegados ao de jusante, medidos a partir de medidores de caudal. Porém, tal pode constituir uma dificuldade uma vez que muitos reservatórios podem não ser dotados de medidores de caudal.

Na ausência desta possibilidade, a modelação hidráulica da quantificação da fuga é realizada conforme descrito em 2.1. Como então se referiu, esta expressão é dependente de um coeficiente β que é introduzido na expressão para melhor representar a lei de vazão da expressão definidora da fuga. Este coeficiente pode ser determinado experimentalmente, mas para casos correntes e para a análise em estudo, foi considerado igual a 0,5. Ao programa é ainda necessário indicar uma posição inicial da fuga de modo a se proceder a tentativas para uma mais exacta localização. Este processo poderá ter o inconveniente de ser moroso e não permitir uma localização da fuga tão rápida quanto desejável.

Depois de introduzidos os dados, o programa calcula as coordenadas dos pontos do perfil correspondentes a cada uma das secções a ser estudadas pelo Método das Características e, ainda, o ponto de funcionamento do sistema elevatório. É também indicada a velocidade média do escoamento e a perda de carga unitária na conduta.

Depois de terminada a simulação, são fornecidos os resultados, quer em forma numérica quer em forma gráfica. O gráfico relativo às envolventes de pressões é obtido através da Matriz “HH” produzida pelo programa – para a análise em estudo é o “output” mais importante fornecido. Esta matriz terá tantas colunas quantas as secções estudadas pelo Método das Características e tantas linhas quantos os instantes em estudo, decorrentes do tempo de simulação definido.

Para o caso de se pretender analisar e estudar a posição da fuga, à Matriz “HH” deve associar-se o vector de tempos – designado por “tmdc”, onde estão definidos os instantes estudados pelo programa. Estes novos dados são posteriormente analisados através de

uma análise por transformadas de FOURIER com o objectivo de determinar a posição da fuga, de acordo com o procedimento adiante desenvolvido.

4. APLICAÇÃO PRÁTICA

Para experimentar o programa desenvolvido, recorreu-se ao Sistema Elevatório de Vilar de Mouros que faz parte integrante do Subsistema de Abastecimento de Água de Cavada e que actualmente abastece parte do concelho Caminha (a parte Norte)..

Este sistema elevatório é principalmente caracterizado, no que para o presente estudo interessa, pelo seu grupo electrobomba e pela conduta elevatória subsequente. As características de ambos os elementos apresentam-se nos quadros 1 e 2.

Quadro 1 – Características Técnicas dos Grupos Electrobomba da Estação Elevatória de Vilar de Mouros (Fonte: AdML)

Grupos Electrobomba	
Potência mecânica	81.4 kW
Potência Eléctrica	110 kW
Velocidade de rotação	1450 rpm
Gama de caudais elevados	0~89 l/s
Gama de alturas elevadas (por impulsor)	21~38 m
Rendimento (η) bomba + motor	80%
Frequência Máxima	50 Hz

Quadro 2 – Características Técnicas da Conduta Elevatória de Vilar de Mouros (Fonte: AdML)

Conduta Elevatória	
Diâmetro Exterior e Interior	355 / 290.7 mm
Desnível geométrico	86.6 m
Extensão	1871.96 m
Pressão Nominal	PN16
Módulo de Elasticidade	1400 MPa
Rugosidade Equivalente	0,05 mm (estimada)
Inclinação Média	4.6 %

De referir que os grupos elevatórios estão interligados a sistemas de regulação de velocidade que, sobretudo no arranque e na paragem dos grupos elevatórios, controlam as rotações dos mesmos.

4.1 Experiências Realizadas

Com o pressuposto de, através de uma instalação real, calibrar e melhor demonstrar as funcionalidades do algoritmo e do programa de cálculo automático desenvolvido e introduzido em capítulo anterior, idealizaram-se e realizaram-se experiências em ambiente real com recurso à realização de ensaios no Sistema Elevatório de Vilar de Mouros.

O princípio básico que orientou tais ensaios consistiu na realização de experiências que permitissem a medição de pressões e de caudais em diferentes secções do circuito hidráulico e em duas situações distintas de ocorrência ou não de choque hidráulico e de existência ou não de uma fuga simulada. De forma sistemática podem resumir-se os ensaios efectuados do modo seguinte:

- a) Ensaios, **sem existência de fuga**, nas situações de regime normal e de regime transitório após a ocorrência do fenómeno de choque hidráulico provocado pelo fecho de um ou dois grupos elevatórios;
- b) Ensaios, **com a existência simulada de uma fuga**, nas situações de regime normal e de regime transitório devido à ocorrência de choque hidráulico provocado pelo fecho de um ou dois grupos elevatórios.

Assim e nesse sentido, foram escolhidas 6 (seis) secções do circuito hidráulico disponível, definidas conforme o quadro 3 e a Figura 2. A opção por estas secções deve-se, por um lado, ao facto de em todas elas ser possível a instalação rápida e fácil de medidores de pressão, à existência de possibilidade de ligação de energia eléctrica e, por outro e ainda, o facto de serem secções que representam com significado adequado o funcionamento dos fenómenos que se pretendem analisar.

Quadro 3 – Localização das Secções de Medição e de Simulação de Fuga

Localização das Secções de Medição e de Simulação de Fuga							
Secção		1	2	3	4	5	6
Distância aos Grupos Elevatórios (m)		-12	1	16	478	1501	1012
Local de Instalação		Conduta Elevatória	Conduta Elevatória	RAC	Ventosa	Conduta Elevatória	Descarga de Fundo
Tipo de Medição		Caudal	Pressão	Pressão	Pressão	Pressão	

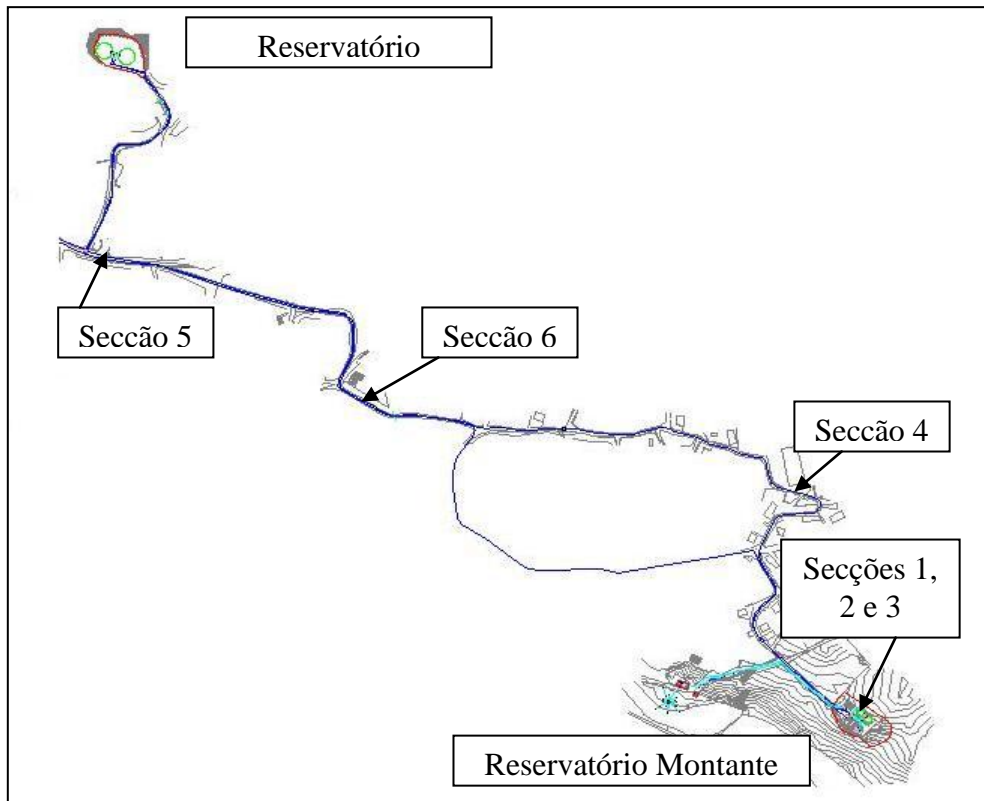


Figura 2 a) – Localização Esquemática das Secções de Medição (vista geral)

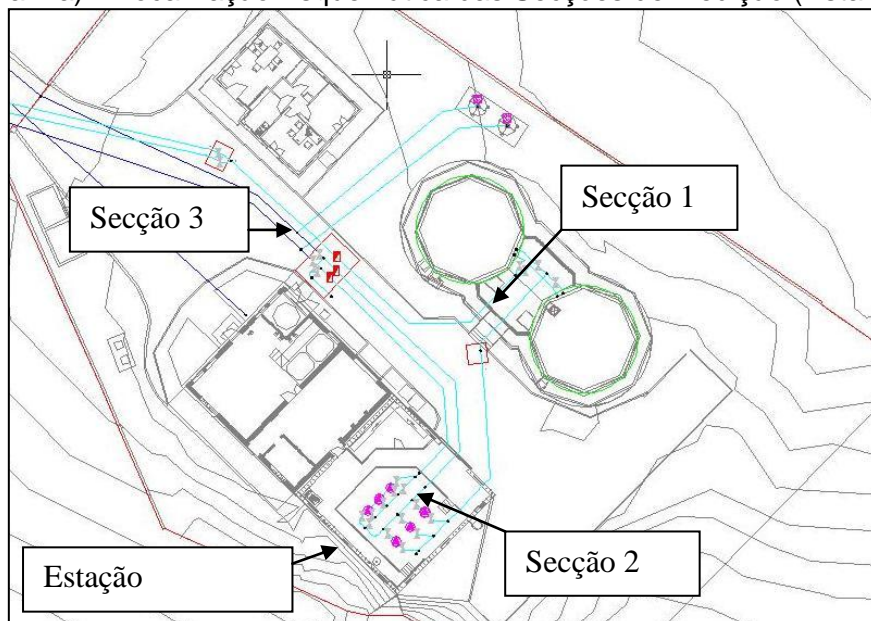


Figura 2 b) – Localização Esquemática das Secções de Medição (vista pormenor da Estação Elevatória)

Para a medição do caudal, aproveitou-se o medidor de caudal instalado nas secções 1 e 6 atrás definidas e que fazem parte da instalação em funcionamento normal, isto é, é o mesmo medidor que serve de controlo aos volumes elevados a partir da estação elevatória. Quanto à medição de pressões e à sua evolução temporal, foram instalados nas secções restantes e atrás citadas, transdutores de pressão

Considerando todo o conjunto de situações atrás descritas, a Figura 3 apresenta, para um exemplo de um dos ensaios realizados, todo o conjunto de resultados de pressões registadas. Dela se pode retirar, ainda que apenas qualitativamente, os diferentes efeitos verificados nas várias situações simuladas de funcionamento.

Nos subcapítulos seguintes, de modo mais explícito, apresentam-se e discutem-se os mesmos resultados analisados em cada uma das situações de simulação propostas e correspondente ao mesmo ensaio.

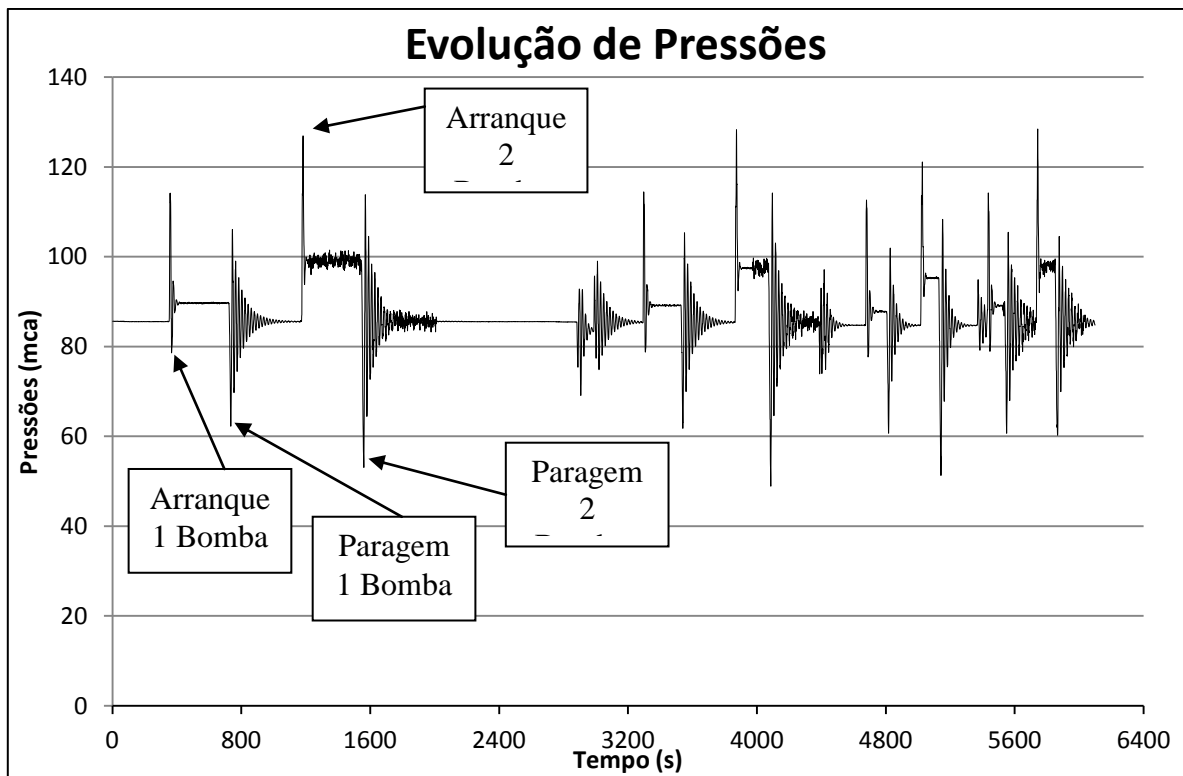


Figura 3 – Evolução de Pressões registadas ao longo de Ensaio Completo (secção 2)

4.1.1 RESULTADOS DAS EXPERIÊNCIAS REALIZADAS SEM FUGA

Para este tipo de experiência foram realizadas medições de caudal e de pressão nas secções já indicadas atrás e para as situações de exploração com um e dois grupos elevatórios, registando-se os efeitos resultantes da paragem do grupo elevatório devido à ocorrência do fenómeno de Choque Hidráulico.

Nas Figuras 4 e 5, são presentes a evolução do valor do caudal bombeado após a paragem do grupo elevatório ou dos grupos elevatórios consoante se está a analisar a situação de funcionamento com uma só bomba ou duas. Os registos foram realizados em intervalos sequenciais de 1 segundo.

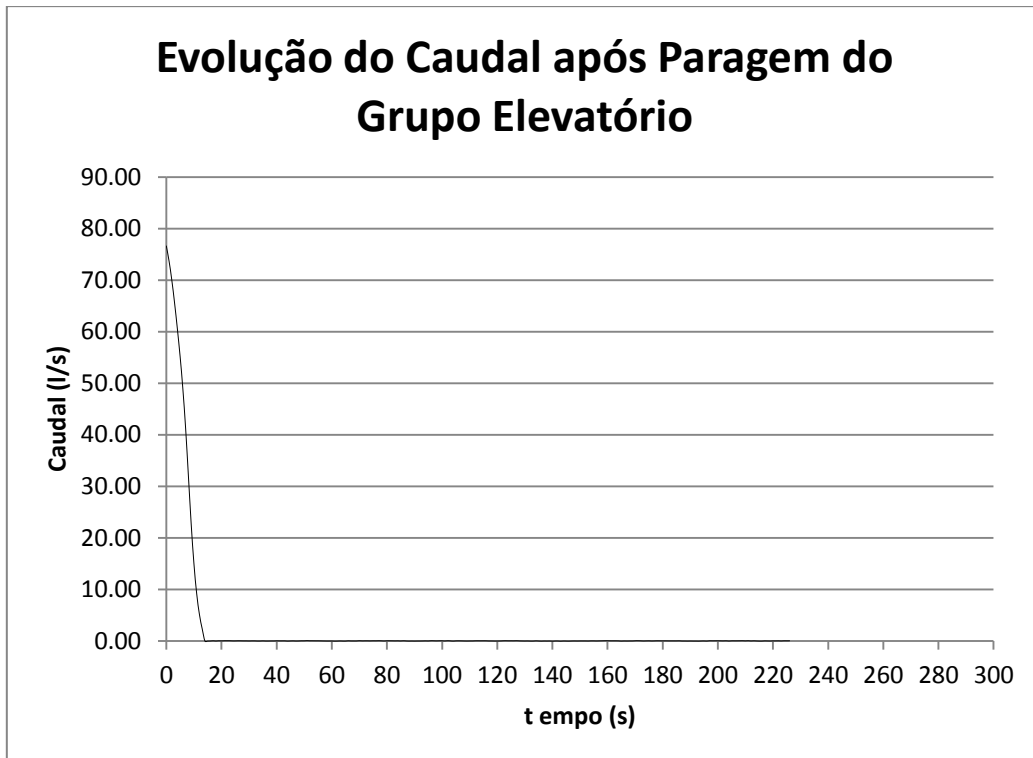


Figura 4 – Evolução do Caudal Bombeado após a paragem de um Grupo Elevatório

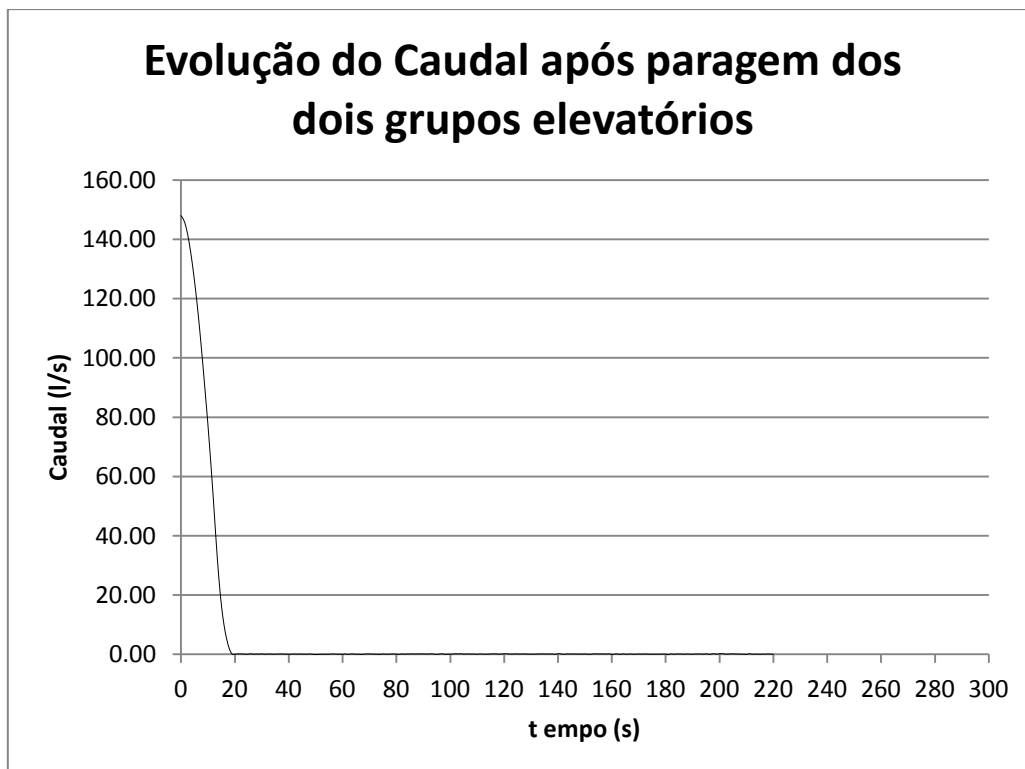


Figura 5 – Evolução do Caudal Bombeado após a paragem de dois Grupos Elevatórios

Os transdutores de pressão e respectivos registadores utilizados nas secções 2, 3, 4 e 5 tiveram como objectivo registar os valores de pressão para a posterior calibração do modelo matemático desenvolvido. Estes foram registados no mesmo intervalo de tempo utilizado para as medições de caudal, ou seja, 1 segundo.

Depois de executado o programa e de obtidos os resultados calculados pelo mesmo, procedeu-se à comparação de resultados entre os valores medidos e os valores obtidos pelo modelo matemático.

Nessa sequência, nas Figuras 6 a 10 são apresentadas as evoluções das pressões, quer as medidas durante a realização da experiência quer as calculadas pelo modelo matemático para as secções 2 a 5 estudadas.

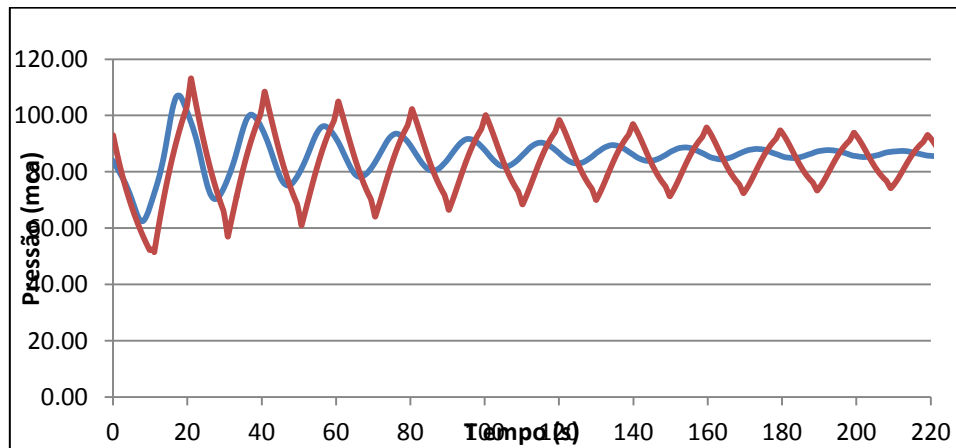


Figura 6 - Evolução de Pressões Medidas (a azul) e Calculadas pelo Modelo (a vermelho) - Secções 2 e 3 – após Paragem de um Grupo Elevatório

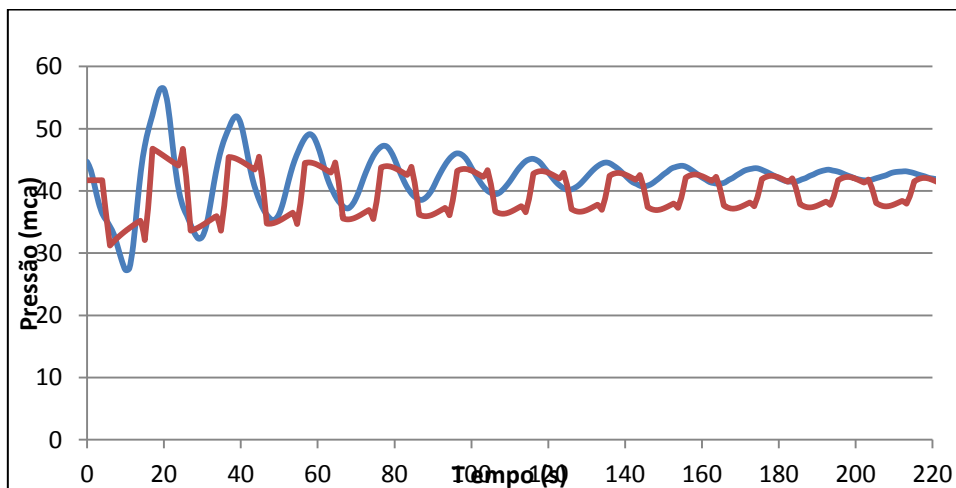


Figura 7 - Evolução de Pressões Medidas (a azul) e Calculadas pelo Modelo (a vermelho) – Secção 5 – após Paragem de um Grupo Elevatório

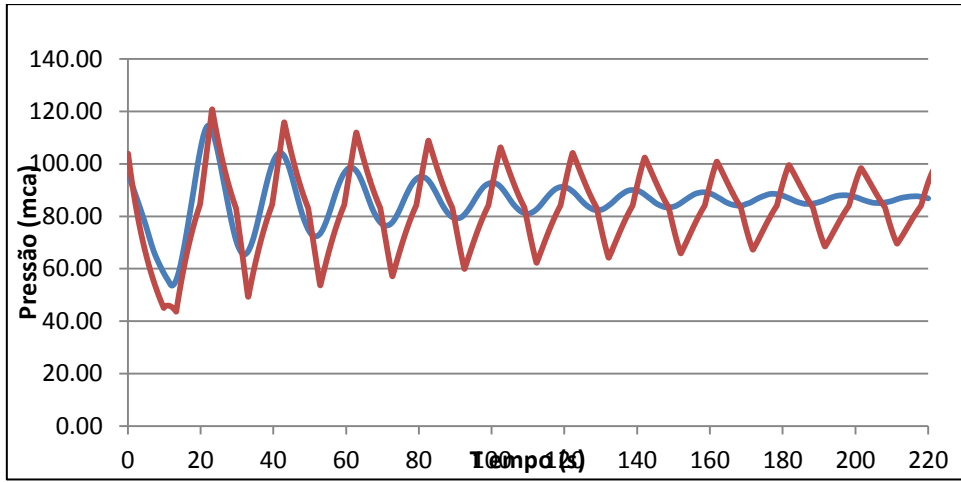


Figura 8 - Evolução de Pressões Medidas (a azul) e Calculadas pelo Modelo (a vermelho) – Secção 2 e 3 – após Paragem de dois Grupos Elevatórios

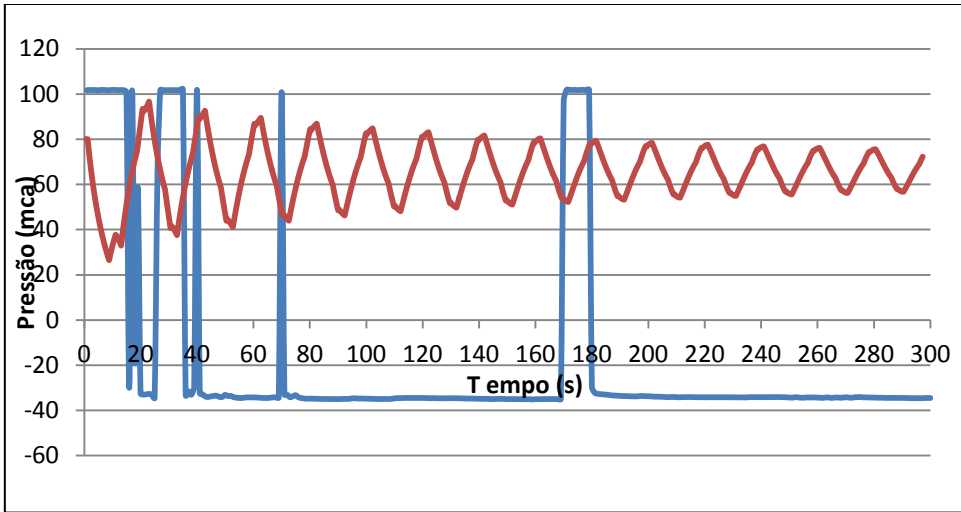


Figura 9 - Evolução de Pressões Medidas (a azul) e Calculadas pelo Modelo (a vermelho) – Secção 4 – após Paragem de dois Grupos Elevatórios

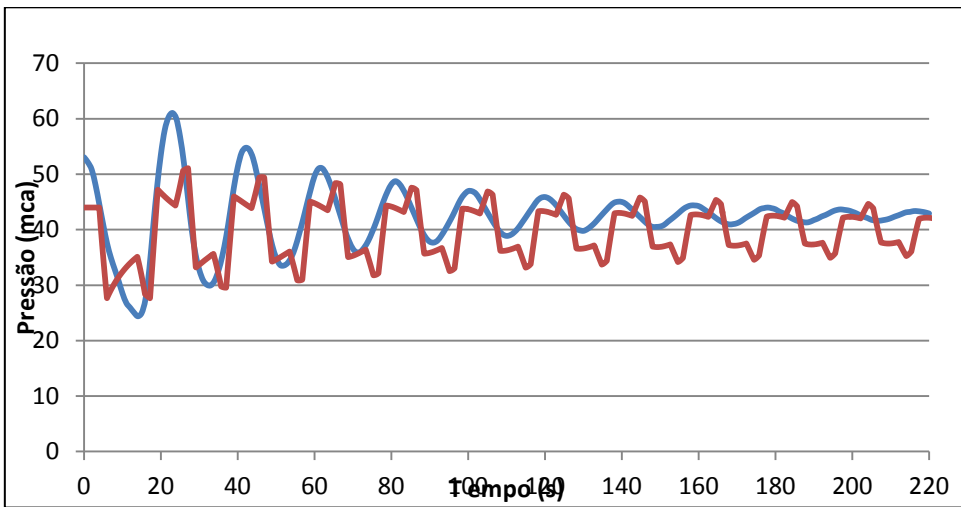


Figura 10 - Evolução de Pressões Medidas (a azul) e Calculadas pelo Modelo (a vermelho) – Secção 5 – após Paragem de dois Grupos Elevatórios

Numa primeira análise aos resultados expressos nestes gráficos, pode afirmar-se da inoportunidade na consideração da secção de medida junto da ventosa – a secção 4. Por isso, e face a este condicionalismo, foram abandonadas as medidas nesta secção.

Por outro lado e para as restantes secções, os gráficos em causa mostram uma relativa discrepância entre os valores medidos e os valores obtidos pelo modelo matemático para a secção em estudo. Com efeito, sobretudo os valores da variável pressão calculadas e medidas demonstram variações, sobretudo nos picos, de algum significado, sendo sempre superiores no caso do valor das pressões obtidas através do modelo matemático.

Este facto é interpretado como devendo ser originado, essencialmente, pela não adequada definição da lei de paragem do grupo electrobomba definida no Modelo Matemático. Na realidade, este modelo considera como Lei de Paragem uma lei teórica baseada nos princípios de redução da velocidade de rotação do motor da bomba de modo livre, isto é, como se a bomba existisse apenas como bomba. Ora acontece, e tal só foi conhecido aquando da realização prática dos ensaios, que o Sistema Elevatório em causa e em particular os grupos elevatórios, dispõem de dispositivos de arranque e paragem de índole eléctrica que, para maior segurança, aumentam o tempo de paragem dos grupos elevatórios traduzindo-se, portanto, em menores valores de pressões. Foi possível obter do fabricante e instalador dos órgãos de controlo a informação de que uma paragem pode atingir os 20s.

Noutro contexto verifica-se que a partir do instante aproximado de 100 segundos começa a haver uma discrepância temporal entre os picos. Supõe-se que este efeito tem a ver com a mesma questão anterior, pelo que é de concluir que tem de ser estudada mais exhaustivamente a Lei de Paragem dos grupos elevatórios.

4.1.2 RESULTADOS DAS EXPERIÊNCIAS REALIZADAS COM FUGA

Para o estudo da possível ocorrência de uma fuga no sistema elevatório foram realizados seis ensaios: para uma fuga “pequena”, outra “média” e outra “grande” e para cada tipo de fuga nas situações de uma e duas bombas ligadas.

Para cada uma das situações foram registados os valores de pressão na secção 2 aquando da paragem dos grupos elevatórios. As diferentes respostas do sistema a esta situação estão presentes nas figuras 11 e 12 (para um e dois grupos elevatórios, respectivamente).

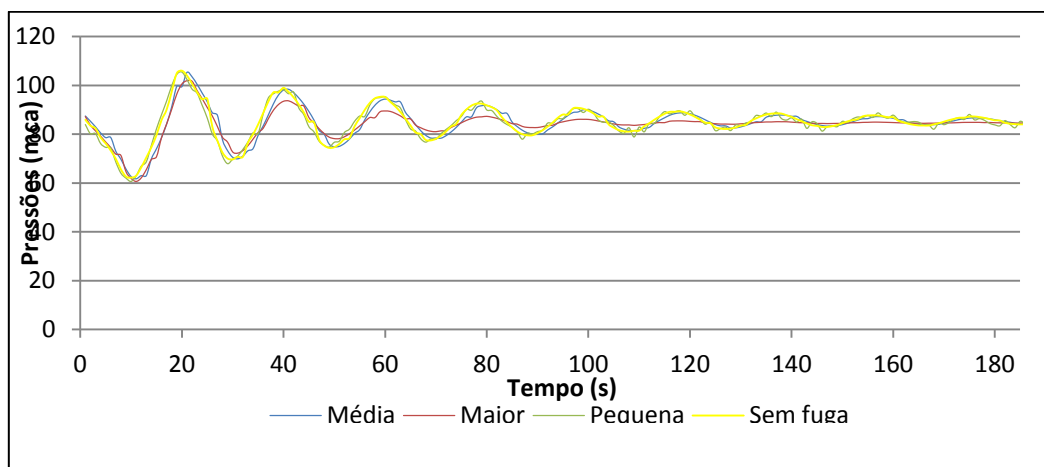


Figura 11 - Evolução de Pressões nas diferentes situações de fuga – Paragem de um Grupo Elevatório

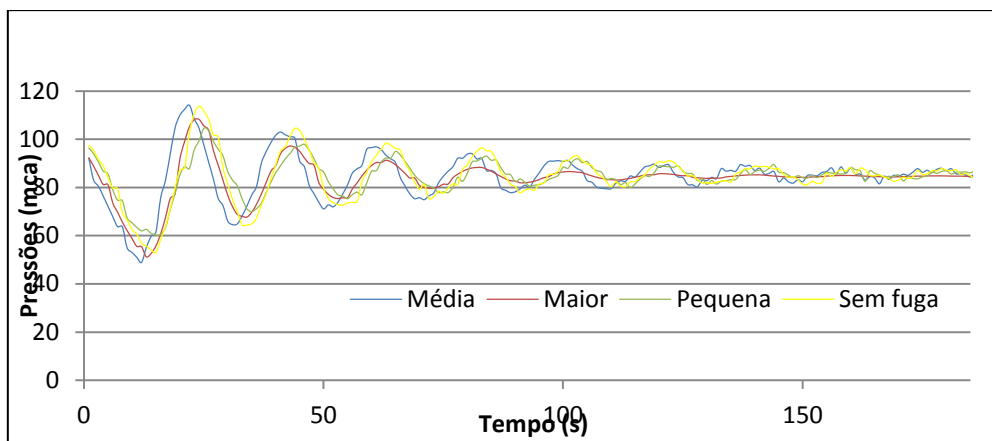


Figura 12 - Evolução de Pressões nas diferentes situações de fuga – Paragem de dois Grupos Elevatórios

Da análise destas Figuras é possível concluir que a flutuação de pressão é menos notória para o caso da fuga de maior caudal, como seria de esperar. E, também, que as flutuações máximas de pressão acontecem mais tarde, e notoriamente mais no caso de a instalação estar a funcionar com dois grupos elevatórios, para os casos das fugas menores.

Tal qual como na situação da inexistência de fuga, apresenta-se de seguida e de modo semelhante a análise das pressões nas secções 2, 3 e 5 da conduta, comparando os valores medidos aquando da ocorrência da menor das fugas simulada, e os valores simulados (com inclusão da fuga) pelo programa de cálculo – figuras 13 e 14.

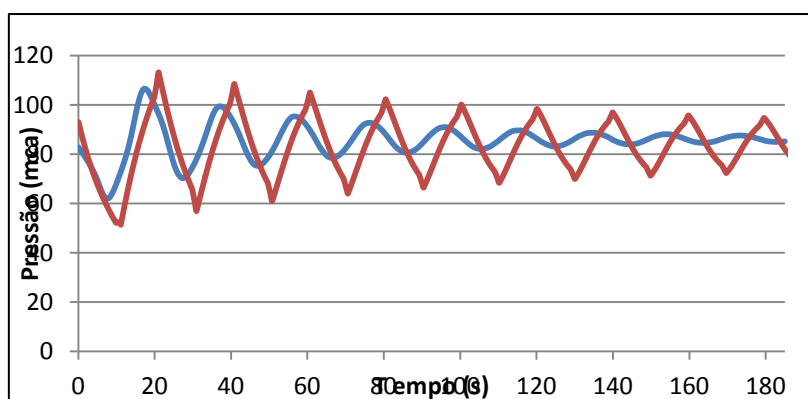


Figura 13 - Evolução de Pressões Medidas (a azul) e Calculadas pelo Modelo (a vermelho) – Secção 2 e 3 – após Paragem de um Grupo Elevatório, com simulação de Fuga

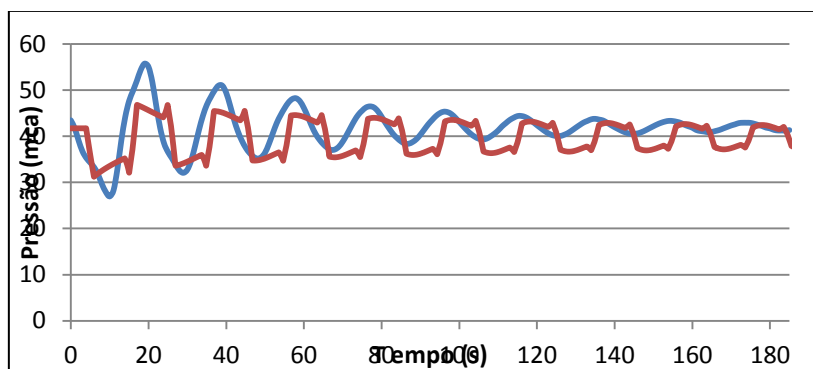


Figura 15 - Evolução de Pressões Medidas (a azul) e Calculadas pelo Modelo (a vermelho) – Secção 5 – após paragem de um Grupo Elevatório, com simulação de Fuga

Tal como para a situação simulada sem fuga de água, também nestes casos é possível observar uma disparidade entre os valores medidos e os valores simulados. As razões para se verificar tal situação são as mesmas que as definidas em 5.3.1 para a experiência sem fuga de água.

4.1.2.1 Localização da Fuga de Água

Face aos condicionalismos verificados nos resultados obtidos e que apenas dão indicação da existência de uma eventual fuga, importa conhecer, mesmo que não exactamente, a secção onde a mesma está a ocorrer.

Para tal recorreu-se ao procedimento desenvolvido por Covas, D. (1998), baseado na obtenção do espectro de energia correspondente às variações de altura piezométrica verificadas durante os ensaios. Este é calculado a partir da transformada de Fourier do sinal medido, utilizando as funções de análise de sinal da linguagem de programação Matlab®.

Esta análise baseia-se, para além de outros parâmetros que não têm particular interesse neste caso, na relação entre as frequências de oscilação das ondas de choque provocadas pelo fenómeno do choque hidráulico com o comprimento total da conduta e a distância desde o ponto onde se verifica a fuga até à fronteira onde se provoca a alteração do escoamento, neste caso o grupo elevatório.

Assim, detectada a frequência correspondente à oscilação provocada pela fuga, ter-se-á que a distância aproximada, X_n , entre a localização da fuga e a fronteira é dada por:

$$X_n = \frac{a}{4f_n}$$

em que f_n é a frequência da oscilação (T^{-1}) e a é a celeridade (LT^{-1}). Esta frequência é uma harmónica da oscilação principal provocada pelo choque hidráulico. O número dessa harmónica, NH_n , é dado por:

$$NH_n = \frac{4Lf_n}{a}$$

em que L é o comprimento total da conduta (L).

No ensaio em causa, para a situação de uma bomba a funcionar, foi simulada uma fuga na conduta realizada por intermédio de uma descarga de fundo localizada na secção 6 (a 1012 m da secção dos grupos elevatórios). Com base nos dados obtidos pelos registadores para a secção 2 da conduta, foi aplicada a transformada de Fourier ao período compreendido entre $t = 0$ s e $t = 180$ s, tendo sido obtido o espectro de energia apresentado na figura 16 a).

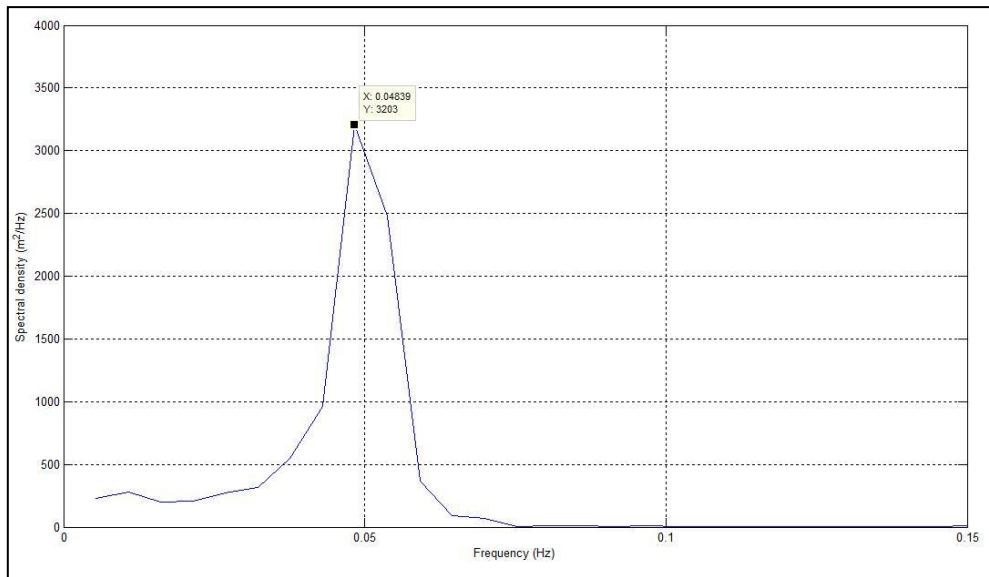


Figura 16 a) – Gráfico Densidade Espectral/Frequência para a situação de Fuga de Água após paragem de um Grupo Elevatório

Apesar de ser clara a harmónica fundamental (correspondente a uma frequência de 0.04839Hz), as restantes harmónicas apenas são detectáveis realizando uma reconfiguração das escalas do gráfico (para escala logarítmica) – figura 16 b).

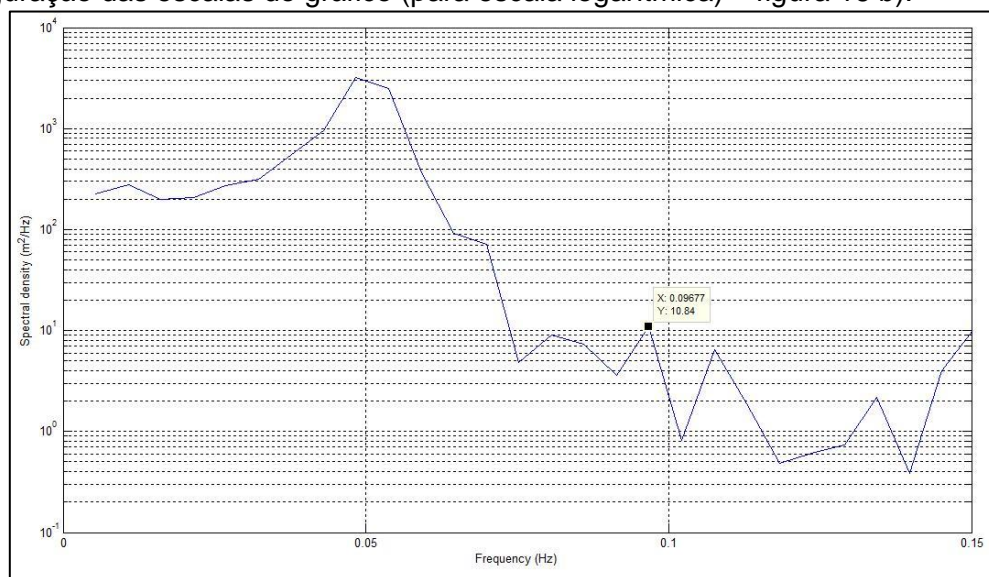


Figura 16 b) – Gráfico Densidade Espectral/Frequência para a situação de Fuga de Água após paragem de um Grupo Elevatório – escala logarítmica

É, então, notório que existe um novo “pico” no gráfico obtido para uma frequência de 0.09677 Hz, a que corresponde a 2^a Harmónica (pela expressão 5.1), valor que introduzido na expressão acima descrita, indica que a distância da fuga simulada aos grupos elevatórios, é de 981m, valor bastante aproximado ao real – aproximadamente 3% inferior.

É de salientar que eventuais erros de medição de pressões têm, obviamente, influência nos resultados e, nesta situação, a sensibilidade dos registadores pode revelar-se preponderante na localização mais precisa da fuga de água.

5. CONCLUSÕES

Neste estudo estudou-se a aplicabilidade do programa de cálculo a um exemplo de conduta elevatória. Por isso, pode afirmar-se, que o programa de cálculo carece de uma melhor afinação e calibração de modo a ser aplicável com mais segurança a qualquer outro sistema elevatório a ser estudado. Assim, dever-se-á, em futuras oportunidades, analisar mais sistemas elevatórios – de outras características que possibilitem ainda a utilização de mais secções de medição, aumentando assim a fiabilidade do modelo matemático a qualquer caso.

A discrepância entre os valores medidos e os valores calculados pelo programa de cálculo, pode ser explicada pela Lei de Paragem dos grupos elevatórios não estar a ser bem reproduzida no modelo e ainda pelo facto de as perdas de carga estarem a ser determinadas analiticamente por um modelo que eventualmente, não se coaduna totalmente com o sistema elevatório em estudo. Assim, sugere-se que em futuros aperfeiçoamentos deste trabalho se faça uma aferição de qual a lei mais adequada para tradução das perdas de carga desenvolvidas. Estes dois aspectos constituem, assim, duas oportunidades de melhoria com vista a uma melhor compreensão do modelo e de uma melhor adequação aos casos concretos.

A localização de uma fuga simulada à custa da obtenção do Espectro de Energia do escoamento obtido a partir das Transformadas de Fourier do escoamento, permitiu concluir da necessidade em explorar ainda mais esta situação. Embora os resultados tenham sido encorajadores, a dificuldade em visualizar e individualizar as harmónicas a seguir à principal obriga a ponderar em muito a correspondente exactidão desta situação.

Convém ainda realçar o facto de se entender que o presente estudo ter ficado um pouco aquém dos objectivos – eventualmente ambiciosos – pretendidos. Com efeito, a ideia inicial era mesmo de obter conclusões, se possível irrefutáveis e sólidas. Tal não foi totalmente conseguido. Como razões principais salientam-se as dificuldades de tempo e de meios na realização dos ensaios experimentais e, talvez, o curto tempo disponível. Contudo, fica a certeza que se realizou um passo em frente possibilitando a abertura de outros desenvolvimentos futuros.

Dado que o presente estudo sobre condutas elevatórias já conheceu similares aplicações ao caso de condutas gravíticas em que se obteve resultados considerados satisfatórios, coloca-se a possibilidade de simular essa mesma situação invertendo o sentido do escoamento, isto é, obrigando a conduta elevatória a funcionar como gravítica, possibilitando que o reservatório de montante passasse a funcionar como o reservatório de jusante e vice-versa. Assim, estar-se-ia na presença de um sistema adutor gravítico, em que o estudo e a detecção de fugas se tem mostrado mais eficiente do que em sistemas elevatórios.

BIBLIOGRAFIA

Novais Barbosa, J. (1985). *Mecânica dos Fluidos e Hidráulica Geral, Volume 1 e 2*. Porto Editora, Porto.

Farley, M., Trow, T. (2003). *Losses in water distribution networks*, IWA Publishing,

Covas, D., (1998). *Detecção e Localização de Fugas em Redes de Distribuição de Água. Método da Análise Hidrodinâmica*. Dissertação para a obtenção de Grau de Mestre em Hidráulica e Recursos Hídricos, Universidade Técnica de Lisboa – Instituto Superior Técnico

Pacheco Figueiredo, M. M. (1990). *Choque Hidráulico em Conduitas Elevatórias. Protecção com Reservatórios de Ar Comprimido*. Trabalho de síntese para Provas de Aptidão Pedagógica. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

Coelho, S., Loureiro, D., Alegre, H. (2006). *Modelação e Análise de Sistemas de Abastecimento de Água – Série Guias Técnicos*. Instituto Regulador de Águas e Resíduos. Laboratório Nacional de Engenharia Civil.

Almeida, B., Martins, S. (1999). *Controlo Hidráulico – Operacional de Sistemas Adutores*. Minerva do Comércio, Lisboa.

Pacheco Figueiredo, M. M. (2007). *Escoamentos Variáveis em Pressão*. Apontamentos da disciplina de Sistemas de Abastecimento de Água do ano lectivo 2007/2008, 5º Ano da opção de Hidráulica do Mestrado Integrado em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia

Camargo, L. (1991). *O golpe de aríete em condutos. Análise pelo Método das Características*. XVI Encontro de Engenheiros de Assistência Técnica. 7-11 de Outubro de 1991, Joiville/SC.