

CONTROLO E AQUISIÇÃO DE DADOS DE UM SISTEMA SEGUIDOR DE PERFIS DE FUNDO

João Palma, Luís Guilherme, Elsa Alves

Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Av. Brasil, 101, 1700-066 Lisboa
E-mail: jpalma@lnec.pt, lguilherme@lnec.pt, ealves@lnec.pt

Resumo: É descrita a solução de controlo e de transferência de dados para computador de um aparelho destinado ao levantamento de perfis de fundo em modelos hidráulicos com leito de areia de pequena granulometria. O novo sistema corresponde à modernização de versões anteriores, no qual se introduziram melhoramentos na robustez, no controlo da aproximação ao fundo, no controlo do motor e no respectivo amplificador de potência. É também apresentada uma unidade digital, baseada em microcontrolador, desenvolvida para aquisição dos dados de posição vertical e horizontal e comunicação com computador através de interface RS-232C.

O novo sistema tem sido utilizado num canal experimental para o estudo da sedimentação em albufeiras. O estudo experimental destina-se à obtenção de dados que permitam caracterizar a deposição de sedimentos grosseiros (formação do delta de deposição) e de sedimentos finos (formação de correntes de turbidez) e validar um modelo computacional para a simulação de correntes de turbidez em albufeiras. São apresentados resultados experimentais que demonstram o desempenho do equipamento na obtenção e caracterização dos perfis do leito móvel ao longo do tempo.

Palavras Chave: perfil de fundo, modelo hidráulico, seguidor de fundo, motor DC, sedimentação em albufeiras.

1. INTRODUÇÃO

Há muito que no LNEC se começaram a desenvolver aparelhos servocontrolados para levantamento de perfis de fundos móveis em modelos hidráulicos [1]. Os mesmos viriam a receber aperfeiçoamentos posteriores [2]. Esses sistemas de medição consistem em posicionadores verticais guiados de forma a levarem a extremidade inferior de uma haste com eléctrodos a uma distância muito curta do fundo (cf. fig. 1), habitualmente constituído por areias de material não condutor, mas sem o destruir.

A movimentação da haste é feita com uma cremalheira e um carreto actuado por um pequeno motor com redutor [3]; a cota do fundo é obtida a partir da posição vertical da haste através de um potenciómetro multivolta com carreto aplicado à mesma cremalheira. A aproximação ao fundo é controlada por detecção da variação da resistência entre eléctrodos no topo inferior da haste. A movimentação

horizontal deste conjunto, acompanhada da medição das posições de translação, permite efectuar o levantamento de ambas as coordenadas do perfil do fundo numa dada direcção.

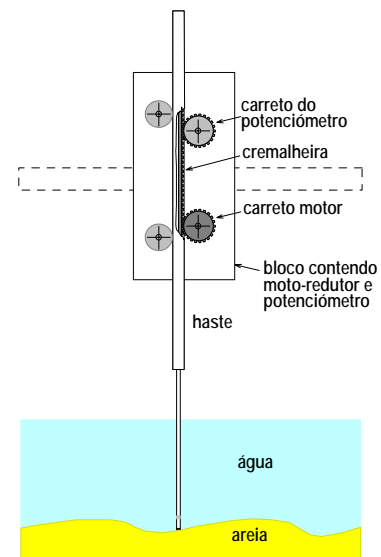


Figura 1 – Descrição pictórica do mecanismo de movimentação vertical e fotografia mostrando o aspecto exterior do aparelho no canal experimental.

Seguidamente mostram-se os desenvolvimentos mais recentes introduzidos neste tipo de equipamento, com os quais se obtiveram melhorias de desempenho, bem como a sua comprovação experimental em modelo físico.

2. CONTROLO DA APROXIMAÇÃO AO FUNDO E DO ACCIONAMENTO VERTICAL

2.1. Solução de controlo

As versões mais utilizadas no LNEC foram projectadas com motores de corrente contínua de potência bastante reduzida que moviam hastes muito leves, com cremalheira em araldite, mas que também resultavam bastante frágeis. A limitação de potência do motor derivava das fracas possibilidades de amplificação electrónica em termos de potência com os recursos da época.

Estes modelos apresentavam também dificuldades de estabilização no controlo de aproximação ao fundo que, por vezes, resultava na penetração da ponteira na areia e no derrube da haste na sequência da translação do bloco. Além disso controlava-se a tensão e não a corrente efectivamente aplicada ao motor, o que dificultava seriamente o controlo com estabilidade devido à irregularidade na queda de tensão no contacto escovas-colector. A regulação de posição com controlo subordinado da corrente fica imune aos efeitos da

queda de tensão referida e torna explícita a actuação através do controlo do binário, logo, da força vertical.

Como na máquina de corrente contínua com fluxo constante a corrente de armadura é proporcional ao binário, o controlo de velocidade ou de posição podem ser realizados por manipulação explícita do binário. Neste caso, tira-se ainda partido de existir controlo permanente sobre a corrente para impedir sobreintensidades. O esquema de controlo é descrito no diagrama da fig. 2 e constitui uma estrutura clássica noutros tipos de accionamentos [4].

A regulação da aproximação ao fundo faz-se através de um anel de controlo de posição, exterior ao anel de corrente, que obtém, por variação da resistência entre eléctrodos da ponteira, o sinal correspondente à distância desta ao fundo.

O equipamento mantém a possibilidade de operação como limnómetro dos seus antecessores [1], isto é, seguidor da superfície da água, embora não tenha sido melhorado para esse efeito.

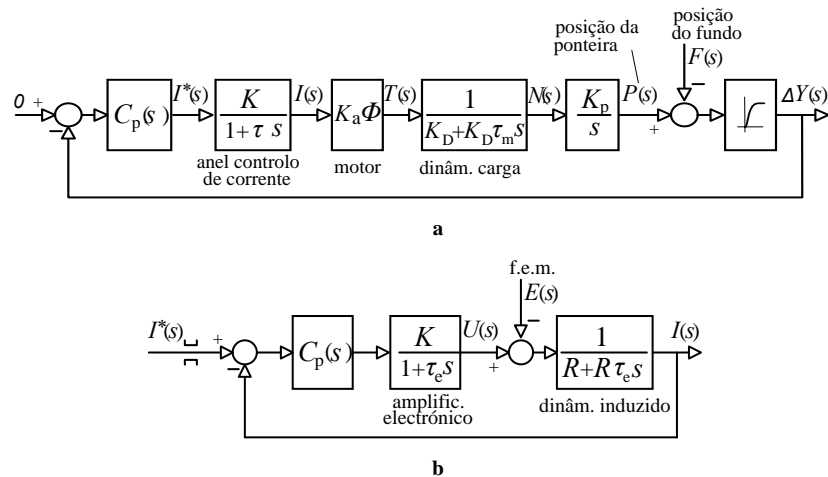


Figura 2 – Esquemas de blocos de: (a) sistema de controlo da aproximação ao fundo; (b) detalhe de controlo do motor de accionamento vertical.

2.2. Implementação electrónica

O controlo da aproximação ao fundo é feito em electrónica analógica (cf. fig. 3), utilizando um andar inicial de transdução de aproximação por desequilíbrio da impedância entre os eléctrodos médio e inferior (zona sujeita a esmagamento da linhas de corrente) relativamente à impedância entre os eléctrodos médio e superior (zona não sujeita a esmagamento). Esta solução procura eliminar os efeitos perturbadores de variação de condutividade da água (por variação de salinidade e de temperatura). A excitação é realizada em alta frequência (10 kHz) para impedir efeitos de polarização electrolítica, seguindo-se a rectificação e filtragem e o regulador da posição de equilíbrio propriamente dito.

Foram testadas algumas variantes de ponteira com diferentes dimensões e posições relativas dos eléctrodos, tendo sido adoptada aquela que revelou melhor desempenho.

A não linearidade de resposta na transdução de aproximação ao fundo é, apesar de tudo, linearizável na zona próxima do encosto; a distâncias maiores tende-se para a saturação que conduz à aplicação da força máxima de actuação. Esta condição é aceitável dado que existe limitação do valor máximo de corrente que pode ser fixado como referência do respectivo anel de controlo.

No andar de amplificação final, anteriormente em meia ponte, foi adoptada agora topologia em ponte (cf. fig. 3) para duplicar a gama de tensões a aplicar à máquina e com isso alcançar maior rapidez no estabelecimento da corrente: $di/dt \approx U/L$, U =tensão aplicada, L =auto-indução do induzido.

Dada a reduzida potência do motor manteve-se o princípio de amplificação linear em vez de utilizar um conversor comutado (*chopper* de quatro quadrantes). Esta solução tem a vantagem de evitar problemas de compatibilidade electromagnética, pelo facto de não ser produtora de harmónicas que poderiam perturbar o método de transdução da aproximação ao fundo.

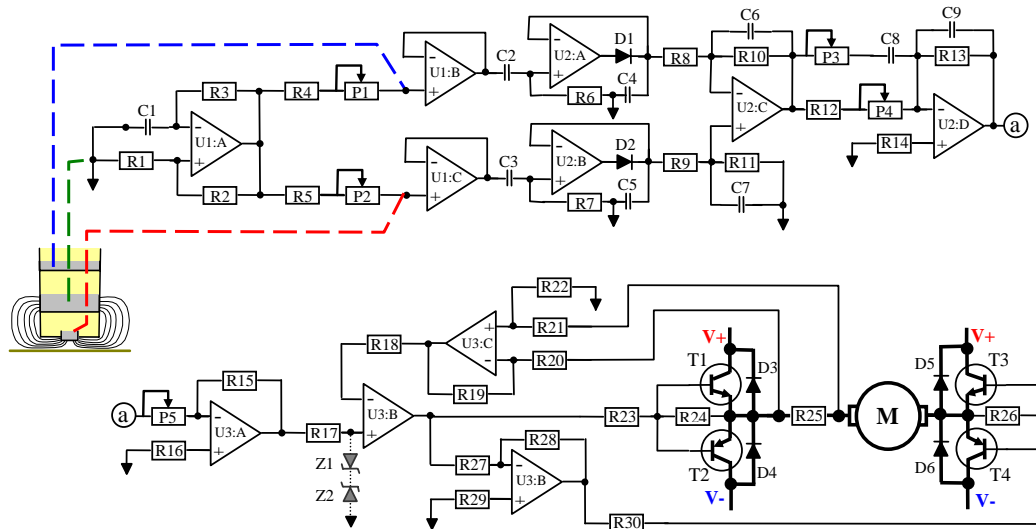


Figura 3 – Esquema electrónico simplificado do sistema de controlo do seguidor de fundos: em cima, a transdução de aproximação ao fundo em alta frequência (10 kHz), rectificação, filtragem e regulação da posição de equilíbrio; em baixo, o controlo da injeção de corrente no motor.

3. AQUISIÇÃO DE DADOS DE PERFIL E COMUNICAÇÃO COM COMPUTADOR

3.1. Concepção geral

Os perfis de fundo são definidos por pares de coordenadas verticais e horizontais $\{X, Y\}$ num elevado número de pontos. Para o efeito há que fazer deslocar ao longo do modelo físico, por meios manuais ou automáticos, o bloco de controlo do seguidor de fundo, medindo e registando as respectivas coordenadas.

A cota vertical do fundo é obtida em modo analógico pelo potenciómetro multivolta com carreto aplicado à cremalheira da haste (cf. fig. 1).

A coordenada horizontal é obtida através codificador (*encoder*) incremental actuado por um sistema de roldanas e cabo de aço. Esta solução, em que se dispensa o codificador absoluto, exige que seja feito um posicionamento inicial numa coordenada pré-definida (neste caso, a origem) e que exista memorização permanente da contagem de impulsos.

Uma vez que o sistema pode permanecer em repouso durante intervalos longos, dispõe-se de uma saída por relé para activação/inibição do módulo de controlo da aproximação ao fundo, a fim de evitar aquecimento desnecessário do motor e do amplificador nessa situação.

O sistema comunica em série com computador a fim de receber comandos de inicialização e activação e enviar dados de coordenadas dos pontos do perfil.

3.2. Sistema digital

A necessidade de comunicação com computador para comando, visualização e arquivamento de dados, para além das funções atrás referidas, motiva a utilização de lógica programada, neste caso baseada em micro-controlador Intel 87C51, que já possui UART e EPROM para memória de

programa. O esquema de blocos do sistema desenvolvido encontra-se na fig. 4.

A aquisição de dados da coordenada horizontal é feita por contagem de impulsos, em modo *up-down* utilizando as duas saídas em quadratura do *encoder*; providenciou-se a possibilidade de memorização desta contagem em RAM não volátil para a hipótese de ensaios de longa duração. Para aquisição de dados da coordenada vertical é realizada uma conversão tensão-frequência do respectivo sinal analógico, sendo depois obtidos os valores de frequência por contagem de impulsos em intervalos de tempo de 40 ms.

A comunicação com computador é feita em modo digital série, assíncrono, ao ritmo de 9600 bit/s, por meio de interface RS-232C. A regra de acesso é *master-slave* com a função de *master* a cargo do PC. O controlo de erros é realizado com palavra de teste longitudinal (*block checksum*) e mecanismo de retransmissão.

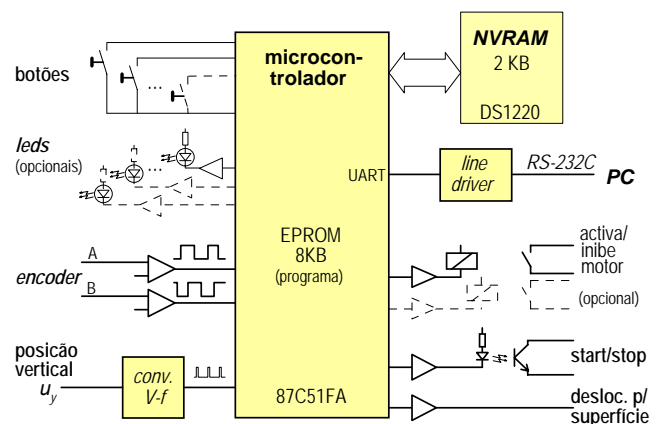


Figura 4 – Estrutura do sistema digital para obtenção de dados de perfil e comando a partir de computador.

Foi elaborado no programa do microcontrolador um breve protocolo de comandos abrangendo: *activação/desactivação do seguidor, memorização da posição $X=0$, subida da haste para junto da superfície, pedido de dados e de estado.*

Com o *encoder* de 1024 impulsos por rotação e o sistema de roldana e cabo de aço utilizado, a resolução horizontal conseguida é de 1320,12 impulsos por metro, tendo a banda morta abertura inferior a ± 1 mm.

A resolução vertical que se obtém após conversão tensão-frequência do sinal do potenciómetro é de 13,5 impulsos por milímetro.

A presente implementação, solicitada para a aplicação descrita na secção 4, foi condicionada pela existência apenas de movimentação manual do carro de instrumentos que transporta o bloco do seguidor de fundos.

A aquisição de dados é feita a um ritmo constante garantido de 5 pontos por segundo. Como a deslocação do bloco é feita manualmente, ou seja, a velocidade não controlável, a fim de evitar sobre aquisição sempre que o operador pare o movimento ou o execute a velocidades muito baixas, são excluídos no registo em ficheiro os dados de pontos distando menos de 2 mm na horizontal ou 0,2 mm na vertical.

Os ficheiros criados no computador são encabeçados pela data e hora do início de sessão (ano/mês/dia, hora/minuto/segundo), seguindo-se os dados relativos às coordenadas dos pontos em mm, pela ordem X (m), Y (mm), conforme se exemplifica com extracto seguinte:

```
* 2006/10/11 11:23:34 *
0.000 3.93
0.004 3.85
0.011 4.00
0.019 4.44
...
8.214 242.37
8.217 244.89
8.220 246.30
```

4. APLICAÇÃO EM CANAL EXPERIMENTAL PARA O ESTUDO DA SEDIMENTAÇÃO EM ALBUFEIRAS

4.1. Enquadramento

A construção de barragens em cursos de água altera as condições de escoamento pré-existentes. A montante da barragem, a redução da velocidade do escoamento do rio e da respectiva capacidade de transporte de sedimentos, origina a sua deposição na albufeira. Os sedimentos mais grosseiros depositam-se na parte superior da albufeira formando um delta; os sedimentos finos são transportados em suspensão para jusante e podem originar a formação de uma corrente de turbidez que se desloca junto ao fundo e que pode atingir o local da barragem.

Os problemas associados à sedimentação de albufeiras incluem a diminuição da capacidade útil, os riscos de obstrução das estruturas de tomada de água e de entrada de sedimentos no equipamento hidroeléctrico, efeitos na

qualidade da água, e erosão e degradação do leito do curso de água a jusante. A previsão da sedimentação em albufeiras é por isso fundamental no planeamento, projecto e gestão de albufeiras e no estudo e implementação de medidas de mitigação.

No âmbito do projecto “Sedimentação em albufeiras por correntes de turbidez”, financiado pela Fundação para a Ciência e a Tecnologia, foi realizada uma campanha de ensaios experimentais com o objectivo de obter dados que permitam: i) esclarecer aspectos importantes da física do fenómeno das correntes de turbidez e da formação do delta de deposição; e ii) validar um modelo computacional para a simulação de correntes de turbidez em albufeiras.

4.2. Descrição da instalação e procedimento experimental

A campanha experimental foi conduzida numa instalação do Departamento de Hidráulica e Ambiente do LNEC. A instalação é constituída por um tanque de alimentação de água a montante, pelo canal de ensaios propriamente dito, pelo circuito hidráulico de retorno, pelo sistema de alimentação de areia e pelo tanque de preparação da mistura de água e sedimento fino [5]. O canal de ensaios possui 19,60 m de comprimento, 0,30 m de largura e 0,75 m de altura máxima.

O perfil longitudinal do fundo do canal foi construído com uma configuração específica para a realização de ensaios com correntes de turbidez e delta de deposição. A zona inicial do perfil, com 4,7 m de comprimento e declive de 0,014, corresponde ao trecho de escoamento no rio. A jusante deste trecho segue-se uma rampa com declive de 30°, próximo do ângulo de repouso da areia, que permite simular o depósito de materiais grosseiros (delta de deposição) no interior de uma albufeira. A jusante da rampa existe um primeiro trecho de 8 m com declive 0,014 e um trecho final de cerca de 3,75 m com fundo plano.

Nos ensaios experimentais foram efectuadas medições dos seguintes parâmetros físicos: caudal líquido, caudal sólido de areia, caudal da mistura de água e sedimento fino, concentração de sedimentos em suspensão, alturas de água, perfis de velocidade das correntes de turbidez e perfis longitudinais do fundo móvel. Na fig. 5 ilustra-se um dos ensaios experimentais realizados.

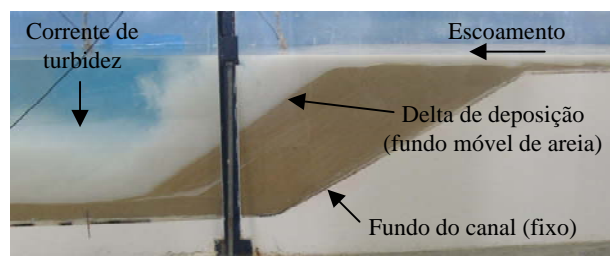


Figura 5 – Ensaios experimentais: formação do delta de deposição (areia) e de correntes de turbidez (sedimento fino).

Antes do início dos ensaios foi colocada no fundo do canal uma camada de areia com cerca de 5 cm de espessura. Na primeira fase dos ensaios procedeu-se à formação do delta de deposição introduzindo areia no canal a uma taxa constante. A areia possui um diâmetro médio de 0,3 mm.

Nesta fase efectuaram-se levantamentos do perfil do fundo móvel de forma a acompanhar a evolução do delta. Na segunda fase dos ensaios interrompia-se a alimentação de areia e introduzia-se no canal uma mistura de água e de sedimento fino (diâmetro médio de 20 μ m) para a simulação de correntes de turbidez. Terminada esta fase procedia-se ao levantamento do perfil do fundo a fim de detectar erosões e deposições provocadas pela passagem da corrente [5].

4.3. Evolução dos perfis do fundo móvel

A análise da evolução dos perfis longitudinais do fundo móvel foi realizada com base em levantamentos periódicos de um trecho de 8,74 m do canal utilizando o seguidor de fundos anteriormente descrito. Em cada levantamento, o número de pares de coordenadas verticais e horizontais $\{X, Y\}$ é variável, dependente da velocidade a que o operador manobra o carro de instrumentos. De forma a poder comparar os diferentes levantamentos numa grelha espacial uniforme foi desenvolvida uma rotina que permite interpolar os valores medidos de forma a obter as cotas do fundo em intervalos regulares, definidos pelo utilizador [6]. Foi considerado adequado um intervalo de 0,5 cm.

Na fig. 6 apresentam-se os perfis longitudinais do fundo móvel durante a formação e evolução do delta de deposição. Conclui-se que o declive da frente do delta aumenta até atingir um valor de equilíbrio de cerca de 33° (próximo do ângulo de repouso da areia). Neste caso, a situação de equilíbrio é atingida ao fim de 2 h e 23 min após o início do ensaio, e, partir desse momento, a frente do delta progride a uma velocidade constante, igual a 5,8 cm/h.

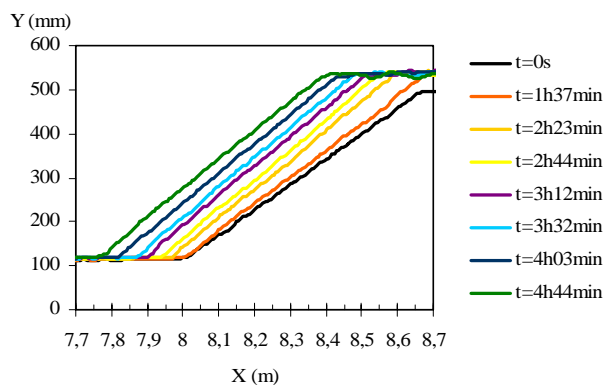


Figura 6 – Perfis longitudinais do fundo móvel ao longo do tempo.

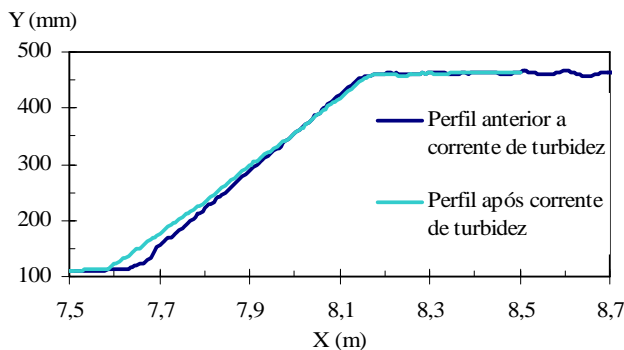


Figura 7 – Perfis do fundo móvel antes e após a passagem de uma corrente de turbidez.

Depois de formado o delta, a passagem de uma corrente de turbidez (cf. fig. 7) dá origem a pequenas variações da cota do fundo ao longo do canal, exceptuando a zona da frente do delta, onde se regista a erosão de sedimentos da parte superior e a sua deposição na base do delta.

5. CONCLUSÕES

O novo sistema de controlo e de aquisição de dados do seguidor de perfis fundos permite a comunicação digital com computador, proporcionando facilidades acrescidas para o comando, o diagnóstico, a visualização e o arquivamento de dados.

Entre os melhoramentos conseguidos com o seguidor de fundos propriamente dito evidencia-se a robustez construtiva, o desempenho do sistema de accionamento para a movimentação vertical e o controlo da aproximação ao fundo. Constatam-se melhorias significativas em termos de rapidez e estabilidade, especialmente com vista a evitar o enterramento da ponteira quando em deslocamento de translacção, com o conseqüente derrube da haste e/ou destruição do modelo.

Após ter sido afinado e colocado em serviço o seguidor tem sido utilizado regularmente com bons resultados, nomeadamente no acompanhamento da frente do delta de deposição caracterizada por declives acentuados ($\approx 33^\circ$) e na detecção de variações muito ligeiras do fundo causadas pela passagem de correntes de turbidez.

AGRADECIMENTOS

Agradece-se ao Núcleo de Sistemas Mecânicos do Centro de Instrumentação Científica do LNEC o desenvolvimento e montagem do sistema de transmissão de movimento horizontal ao *encoder*. Agradece-se à Fundação para a Ciência e a Tecnologia (FCT) o financiamento concedido no âmbito do projecto POCTI/ECM/45778/2002 – “Sedimentação em albufeiras por correntes de turbidez”.

REFERÊNCIAS

- [1] Cardoso, T., *Unidade para o Levantamento Automático de Perfis de Fundo*, trabalho apresentado para obtenção de certificado de estágio, LNEC 1964.
- [2] Leite, D., Documentação diversa, não seriada, LNEC – CIC.
- [3] Azevedo, F., Morais, P., *Levanteador de Fundos de 600 mm, Estudo e Projecto de parte Mecânica*, relatório LNEC 17/89 – CPCE, 1989.
- [4] Palma, J., *Accionamentos Electromecânicos de Velocidade Variável*, ed. F. Gulbenkian, 1999.
- [5] Alves, E., *Sedimentação em Albufeiras por Correntes de Turbidez*, Dissertação de Doutoramento (documento provisório), Maio de 2007.
- [6] González, J., *Experimental Study of Reservoir Turbidity Currents. Development and Application of Data Processing Routines for Velocity and Bed Profiles*, relatório LNEC 104/2007 – NRE, 2007.