

APROVEITAMENTO HIDROELÉCTRICO DE EL BORJ (MARROCOS)

Concepção, dimensionamento e optimização do aproveitamento

António PEREIRA DA SILVA

Engº Civil, MSc Hidráulica e Recursos Hídricos, Director Adjunto do Serviço de Hidráulica da COBA, Av. 5 de Outubro, 323, 1649-011, Lisboa, +351.217925000, aps@coba.pt

Carlos LOPES GONÇALVES

Engº Civil, Director para as Actividades para o Exterior da COBA, Av. 5 de Outubro, 323, 1649-011, Lisboa, +351.217925000, c.l.goncalves@coba.pt

Carlos CARVALHO DIAS

Engº Civil, Serviço de Electromecânica da COBA, Av. 5 de Outubro, 323, 1649-011, Lisboa, +351.217925000, cd@coba.pt

VICENTE RODRIGUES

Engº Geólogo, Serviço de Geotecnia da COBA, Av. 5 de Outubro, 323, 1649-011, Lisboa, +351.217925000, vcr@coba.pt

O aproveitamento hidroeléctrico de El Borj ficará situado nas cabeceiras do rio Oum Er Rbia, em Marrocos, integrando uma barragem de derivação com uma altura máxima de 25 m e 270 m de desenvolvimento do coroamento, um circuito hidráulico composto por um túnel com 10,5 km de comprimento, uma chaminé de equilíbrio com 82 m de altura e uma conduta forçada com 210 m e por uma central com 21,3 MW de potência instalada.

Na presente comunicação apresenta-se a metodologia utilizada para o dimensionamento e optimização global do aproveitamento. Apresenta-se igualmente a descrição das obras que o integram e as condicionantes que estiveram na base das soluções adoptadas, incluindo a selecção de equipamentos.

São focados os aspectos fundamentais da concepção, dimensionamento e optimização das diferentes estruturas do aproveitamento, nomeadamente:

- As alternativas analisadas e a solução adoptada para a barragem e seus órgãos hidráulicos, incluindo derivação provisória, descarregador de cheias, tomada de água e desarenador, que foram objecto de estudo em modelo reduzido.
- A definição do traçado em planta e perfil e a optimização do dimensionamento hidráulico (regime permanente e transitório) do túnel, chaminé de equilíbrio e conduta forçada.
- O número e tipo de grupos a instalar na central hidroeléctrica.

O Projecto para Concurso do aproveitamento foi elaborado para o “Office National de l’Électricité” (ONE) do Reino de Marrocos por um Consórcio liderado COBA que inclui também a empresa de consultoria marroquina PROJEMA. Algumas das componentes da obra encontram-se actualmente em fase concurso para construção.

Palavras-chave: hidroeléctrico, central, barragem, dimensionamento, equipamentos.

1 – INTRODUÇÃO

O aproveitamento hidroeléctrico de El Borj situa-se no rio Oum Er Rbia, um dos principais rios de Marrocos, constituindo o segundo escalão da cascata prevista para o seu curso superior. O aproveitamento situa-se no médio Atlas, próximo da cidade de Kénifra (Figura 1), e tem por finalidade única a produção de energia. O aproveitamento turbinará a fio-de-água o caudal razoavelmente regular proveniente da nascente do Oum Er Rbia, utilizando a queda de aproximadamente de 130 m disponível num troço com cerca de 15 km entre as localidades de Tanafnit e de El Borj. É constituído por uma barragem de derivação, por um circuito hidráulico integrando tomada de água, túnel e conduta forçada, e por uma central hidroeléctrica e sub-estação.

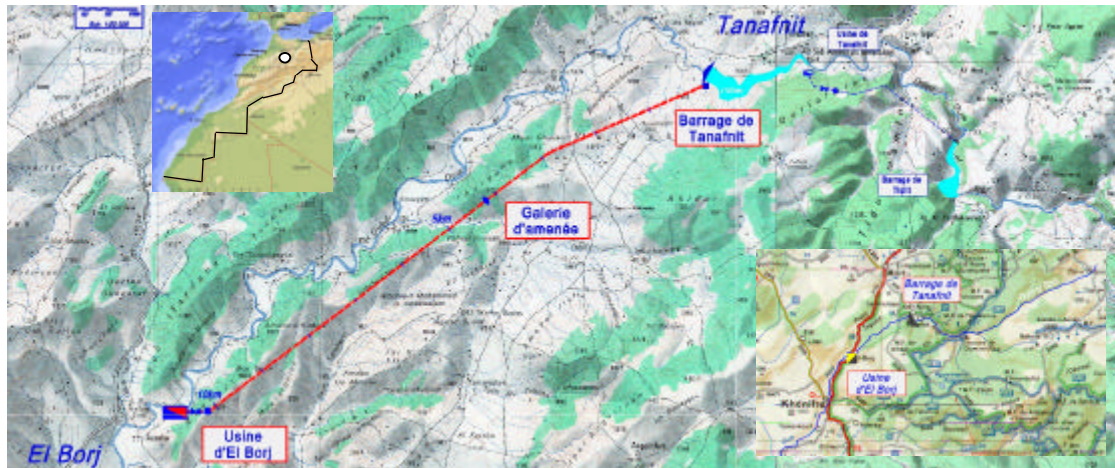


Figura 1 – Localização do aproveitamento hidroeléctrico de El Borj

Este aproveitamento, embora possua uma configuração geral que se poderá considerar clássica, constitui um caso de estudo bastante interessante, por abranger um importante conjunto de situações de projecto que são habituais neste tipo de obras. As soluções encontradas são o resultado de considerações de ordem técnica e de optimização económica que visaram encontrar soluções seguras e de que resultassem economia e fiabilidade na construção e exploração.

As alternativas estudadas e as soluções adoptadas resultaram de uma abordagem multidisciplinar, que exigiu uma estreita integração em todas as fase dos estudos de especialistas das várias áreas técnicas envolvidas, designadamente de hidrologia, hidráulica, ambiente, geotecnia, estruturas e electromecânica.

Na presente comunicação apresenta-se a metodologia utilizada para o prédimensionamento e optimização global do aproveitamento (secção 2), os aspectos fundamentais da concepção, dimensionamento e optimização das diferentes estruturas e as características adoptadas para as diferentes obras, incluindo os equipamentos (secções 3 a 5). É ainda feita referência aos estudos em modelo hidráulico reduzido (secção 6).

2 – DIMENSIONAMENTO GLOBAL DO APROVEITAMENTO

2.1 – Estudos realizados

Este aproveitamento foi objecto de um estudo preliminar de viabilidade elaborado pela EDF em 1981. Os estudos agora realizados para o ONE compreenderam:

- Estudos de base, incluindo estudos hidrológico-energéticos, estudos geológicos e geotécnicos e estudo de impacto ambiental;
- Estudo Prévio e de Viabilidade económica.
- Projecto para Concurso.

2.2 – Hidrologia e recursos hídricos disponíveis

A bacia hidrográfica no local da barragem de derivação tem cerca de 850 km². Os recursos hídricos a mobilizar pelo aproveitamento hidroeléctrico foram caracterizados com base numa série de 30 anos de registos de caudais diários numa estação hidrométrica situada a jusante.

O regime hidrológico do rio caracteriza-se por uma grande regularidade dos caudais afluentes (Figura 2). No período de 30 anos considerado o caudal de base mínimo foi de 7,20 m³/s, pouco inferior a metade do caudal médio anual de 16,5 m³/s (520,2 hm³/ano). Verifica-se igualmente uma grande regularidade interanual; o escoamento mínimo é de 8,8 m³/s (278,1 hm³/ano) e o máximo de 27,44 m³/s (865,2 hm³/ano). A cheia de projecto, para o período de retorno de 10 000 anos, foi estimada em 1 100 m³/s.

O regime hidrológico do local do aproveitamento não exige a criação de uma capacidade de armazenamento significativa para a plena utilização dos recursos hídricos para produção de energia. Optou-se assim por considerar uma albufeira com capacidade apenas para a regularização diária das afluições (um pouco superior a 0,5 hm³) e permitir a produção de energia nos períodos diários de maior valorização da energia. Por outro lado, o local previsto para a barragem não permite a criação de uma albufeira de grande capacidade, uma vez que inundaria áreas importantes de terrenos agrícolas e da localidade Tanafnit, o que não foi considerado viável.

Para a avaliação da capacidade de produção de energia elaborou-se um programa de cálculo automático (Figura 3) que faz a simulação da exploração diária e horária e calcula a valorização da energia produzida em função das características do aproveitamento – essencialmente queda útil disponível e caudal equipado – e do tarifário considerado. Foi considerada uma reserva para garantir um caudal ecológico permanente a jusante da barragem.

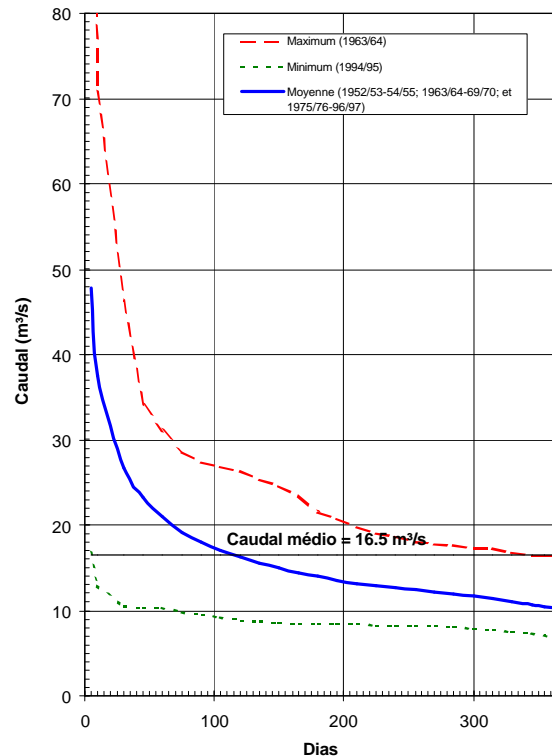


Figura 2 – Curvas de duração dos caudais diários

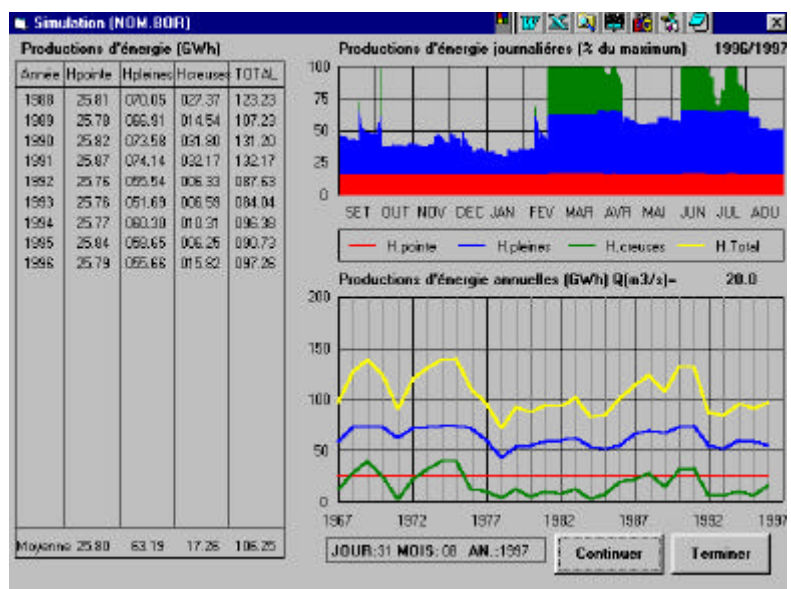


Figura 3 – Programa de simulação da exploração ao aproveitamento

2.3 – Variantes de configuração do aproveitamento

Numa primeira fase do estudo foram definidos um conjunto de cenários globais que condicionam a capacidade de produção de energia, que se definem pelas seguintes características principais:

- Nível de pleno armazenamento da albufeira: consideraram-se as cotas 1025 e 1020 m.
- Localização da central: dois locais, afastados cerca de 1 km .
- Caudal de equipamento da central: foram considerados valores entre 10 e 40 m³/s.

A combinação destas alternativas conduz à definição de 4 variantes de configuração do aproveitamento, sendo para cada uma considerados os diferentes valores do caudal de equipamento.

Para a valorização económica da energia produzida foram utilizados os tarifários definidos pela ONE, que tem em consideração o período do dia de produção (horas de ponta, horas cheias e horas de vazio), o dia da semana (dia útil, fim de semana ou feriado) e o período do ano (inverno ou verão). Consideraram-se como habitual, custos de construção e exploração ao longo da vida útil das obras e diversos valores da taxa de actualização dos investimentos.

O estudo de viabilidade económica consistiu na determinação dos principais indicadores de rentabilidade económica: Valor Actualizado Líquido (VAL), Taxa Interna de Rentabilidade (TIR) e Tempo de Amortização do Investimento . Deste estudo resultaram as seguintes conclusões principais:

- Adoptou-se o NPA à cota mais elevada, 1025; a que a redução de custo associada a uma barragem de menor altura não compensa a diminuição de produção que resulta da menor queda disponível, mesmo considerando a recuperação de parte dessa energia pelo aproveitamento de montante que rejeita os caudais turbinados na albufeira da barregem.
- A localização da central mais a jusante aumenta a queda bruta disponível e facilita a implantação do edifício e acessos, mas exige um maior desenvolvimento do circuito hidráulico com aumento de custo e diminuição da rentabilidade económica.

Da análise da variação dos indicadores económicos, resultou a definição do caudal equipado de 24 m³/s a que corresponde à maximização da TIR (Figura 4) e a valores do VAL próximos do máximo.

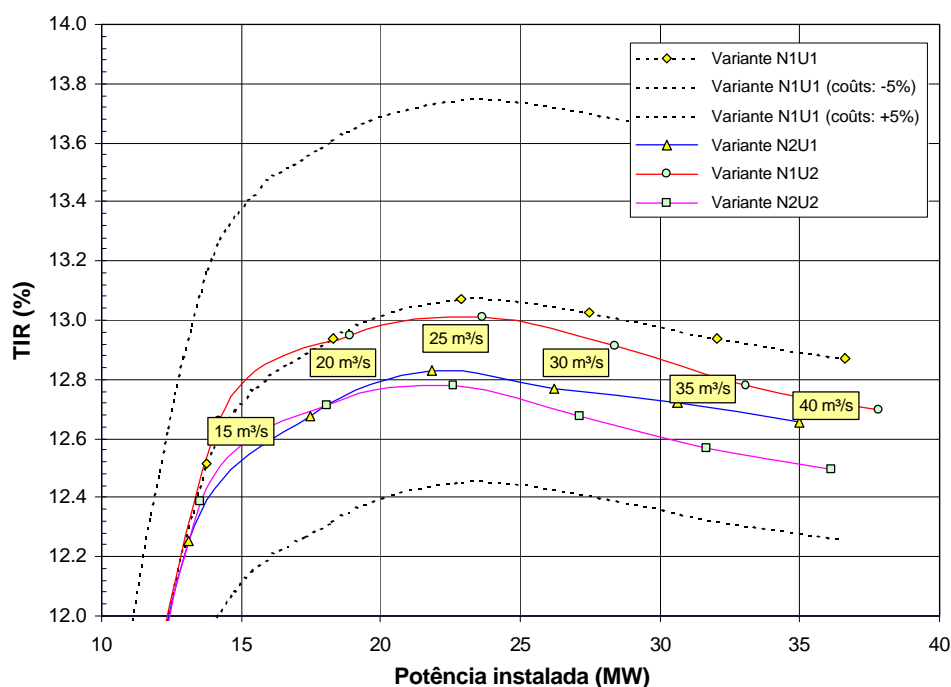


Figura 4 – Taxa Interna de Rentabilidade (TIR) do aproveitamento de El Borj

2.4 – Solução adoptada para o aproveitamento

Na solução adoptada, o aproveitamento será constituído pelas seguintes componentes principais:

- Barragem de derivação com uma altura máxima de 25 m e 270 m de coroamento, criando uma albufeira com uma capacidade útil de de 0,72 hm³.
- Circuito hidráulico com um desenvolvimento total de 10,7 km, incluindo tomada de água e desarenador, galeria de adução com um comprimento de 10,5 km e 3,30 m de diâmetro interior, chaminé de equilíbrio, válvula de protecção e conduta forçada com 200 m de desenvolvimento.
- Central hidroeléctrica, com uma potência de 21,3 MW, correspondente a um caudal de 24 m³/s e queda útil de 106,5 m (queda bruta de 127,0 m).
- Estradas e ponte de acesso.

A produção média anual foi estimada em 108,6 GWh/ano, tendo em consideração os períodos de indisponibilidade da central. Relativamente aos valores previstos no estudo preliminar anterior a solução adoptada corresponde a um acréscimo do caudal equipado de 20 para 24 m³/s e da potência instalada de 18 para 21,3 MW.

3 – BARRAGEM DE DERIVAÇÃO

3.1 – Características gerais e alternativas analisadas

A barragem de derivação ficará situada num troço do rio que apresenta características topográficas favoráveis à implantação da obra e à criação de uma albufeira com a capacidade de armazenamento desejada.

Nos estudos preliminares, a solução prevista para a barragem consistia numa obra mista, com um corpo central em betão, correspondente ao descarregador, e diques laterais nas margens, construídos em enrocamento com cortina de impermeabilização em betão. O descarregador era equipado com descargas de fundo de grande capacidade e comportas de superfície dimensionadas para a passagem de pequenos caudais (Figura 5).

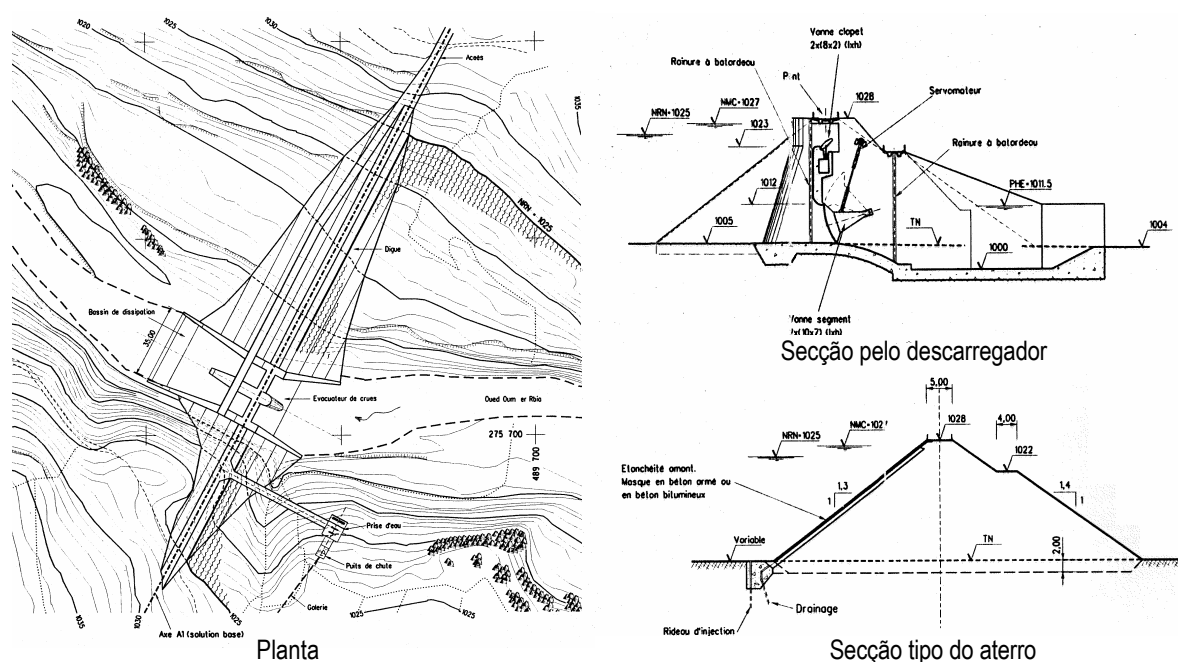


Figura 5 – Solução prevista nos estudos anteriores para a barragem de derivação

Após análise crítica da solução anterior, fomos conduzidos a um conjunto de variantes, que visando a optimização técnica e económica da obra, consideraram as seguintes alternativas:

- Optimização da implantação do eixo da barragem;
- Localização do descarregador de cheias;
- Perfil tipo e materiais de construção do aterro;
- Cota da soleira do descarregador de cheias.

As características geométricas da barragem não diferem significativamente entre os diferentes eixos estudados, pelo que a definição do eixo da barragem foi condicionada pelas condições de fundação e implantação dos órgãos hidráulicos, designadamente do descarregador de cheias.

As características geotécnicas e geotécnicas do local previsto são caracterizadas essencialmente i) pela presença de afloramentos de xistos no leito menor do rio e na margem esquerda, possibilitando a implantação de estruturas em betão a uma profundidade da ordem de cerca de 2,0 a 3,0 m e ii) margem direita constituída por terrenos basálticos com elevada porosidade e níveis calcários com carsificação, apenas permitindo a implantação de uma obra em aterro.

O elevado valor do caudal de ponta da cheia de projecto, a pequena capacidade de amortecimento da albufeira e a reduzida largura disponível para implantação de uma obra em betão conduz à necessidade de adopção de um descarregador equipado com comportas. Por esta razão foi considerada a implantação do descarregador no maciço xistoso da margem esquerda por forma a reduzir a altura necessária para essa estrutura. Esta implantação exige importantes escavações, contudo, o material resultante pode ser integralmente utilizado nos maciços de estabilização do corpo do aterro da barragem. O perfil tipo adoptado para a barragem em aterro teve em consideração a necessidade de aproveitamento desse material. Os restantes materiais necessários serão resultantes de zonas de empréstimo no interior da albufeira.

A soleira do descarregador de cheias foi definida a uma cota o mais alta possível, de forma a reduzir a altura da estrutura e das comportas, tendo em consideração a largura disponível para implantação da obra em betão e a criação de condições de escoamento adequadas na tomada de água. Os níveis da albufeira inferiores à cota da soleira são considerados capacidade morta.

Com a solução adoptada obteve-se uma redução significativa de custo relativamente à solução considerada nos estudos anteriores, nomeadamente através da redução da altura da estrutura do descarregador de 25 para 13 m e pela eliminação a necessidade de recorrer a enrocamentos para construção dos maciços do aterro. Por outro lado a zona de contacto entre os corpos em betão e o aterro, zona sensível do ponto de vista da estanquidade, terá menor altura e ficará sujeita a pressões hidráulicas muito inferiores e apenas numa das faces do descarregador. Os equipamentos hidromecânicos também resultam simplificados.

3.2 – Descrição da solução adoptada

A solução adoptada para a barragem compreende um troço em aterro zonado, no leito menor e margem direita e um descarregador de cheias em betão implantado na margem esquerda (Figura 6).

A altura máxima da barragem é de 25 m e o desenvolvimento total do coroamento é de 270 m, sendo 230 m correspondentes ao troço em aterro e 40 m à estrutura em betão. O eixo da barragem é formado por dois alinhamentos em planta, com transição circular entre os troços em aterro e em betão.

A capacidade de armazenamento total de 2,1 hm³ (NPA à cota 1025 m) e capacidade útil de 0,73 hm³, considerando uma o nível mínimo de exploração 3,0 m abaixo do NPA. O nível de máxima cheia atinge a cota 1006,3, tendo-se fixado o coroamento à cota 1028 m.

O aterro tem um perfil zonado, com um volume total de 200 000 m³, formado por um núcleo de materiais argilosos e maciços estabilizadores constituídos por xistos resultantes da escavação. A largura do coramento é de 7,0 m, ambos os paramentos têm uma inclinação de 2:1 (H:V), sendo protegidos por enrocamento e possuindo banquetas intermédias.

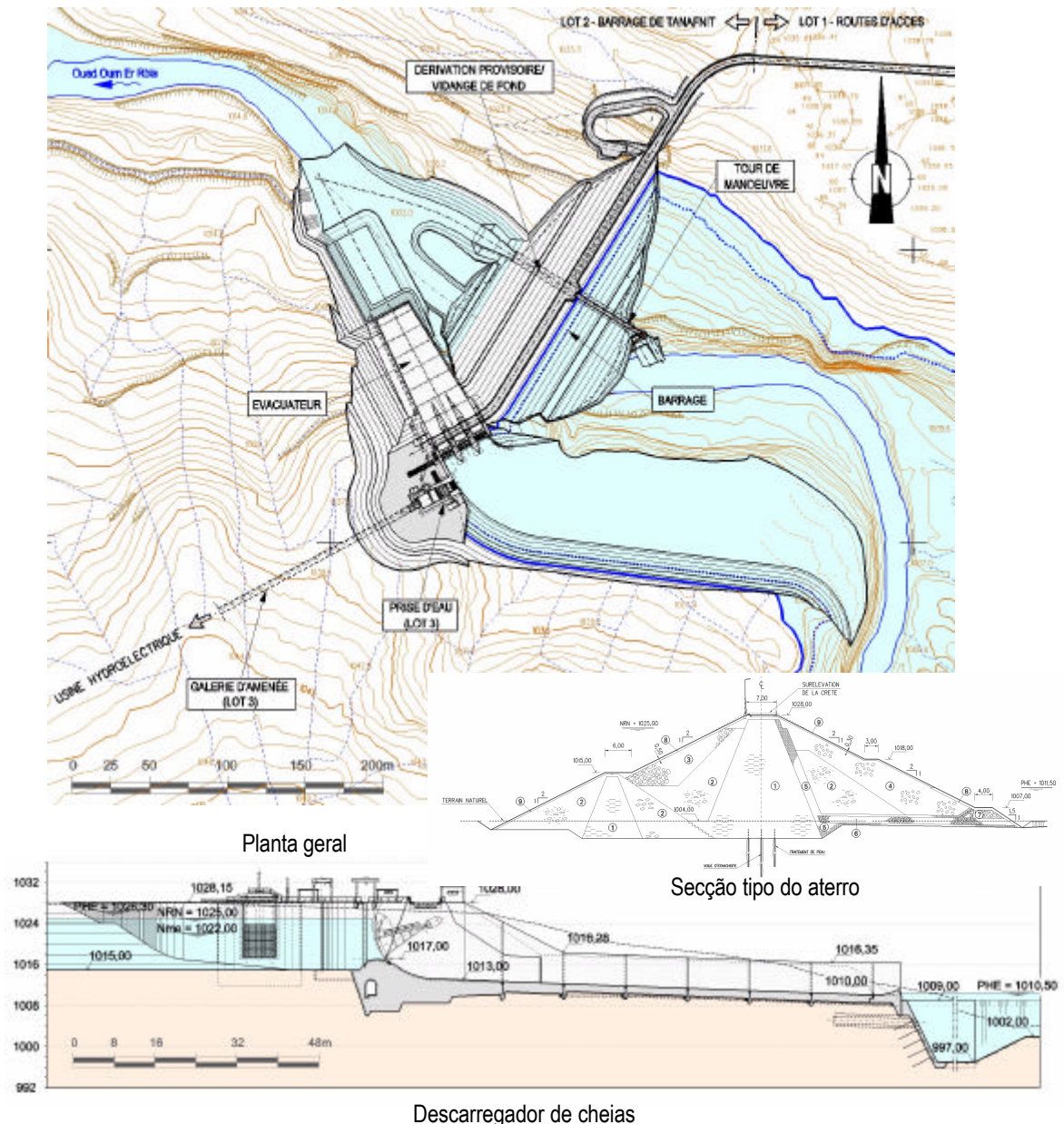


Figura 6 – Solução adoptada para a barragem de derivação

O descarregador de cheias é constituído por uma soleira descarregadora do tipo WES com uma largura útil de 27 m, dividida em 3 vãos iguais, seguida de um canal rectangular convergente com alinhamento rectilíneo. Termina numa estrutura em salto de ski com largura de 25 m; a dissipação de energia é realizada no leito do rio, numa pré-fossa escavada. O comprimento total do descarregador é de 113 m. A montante será criada uma plataforma de entrada escavada, delimitada por muros verticais em betão para guiamento do escoamento na zona adjacente ao descarregador.

A barragem integra uma descarga de fundo, constituída por uma torre de tomada com altura máxima de 30,30 m desde a fundação, uma galeria em betão com diâmetro interior de 4,60 m e comprimento de 90 m e uma estrutura de dissipação de energia por ressalto hidráulico. O caudal dimensionamento é de 42 m³/s. A galeria será utilizada como derivação provisória e posteriormente transformada em descarga de fundo.

Foi ainda prevista a existência de uma galeria de injeção e de drenagem sob o aterro da margem direita, com um comprimento de cerca de 103 m, na zona onde se ocorrem formações com maior permeabilidade.

3.3 – Equipamentos hidromecânicos

Os equipamentos hidromecânicos do descarregador consistem em 3 comportas sector com accionamento hidráulico e dimensões 9,00x9,62 m² (lxh), com volets com 5,30x2,00 m² (lxh), para passagem de pequenos caudais e de corpos flutuantes. São previstas ensecadeiras por elementos manobradas por pórtico rolante a partir do coroamento.

A solução adoptada possibilita a minimização da largura do descarregador, assegura a passagem do caudal de ponta com uma sobre-elevação mínima do plano de água, a passagem de sedimentos afluentes, evitando a sua entrada na tomada de água e portanto, garantindo assim a manutenção do volume útil da albufeira e finalmente, possibilitam a regulação fina do plano de água na albufeira e do caudal descarregado.

A descarga de fundo será equipada com duas comportas vagão com 1,60x2,40 m² (lxh), manobradas por servomotor a partir do topo da torre de manobra.

4 – CIRCUITO HIDRÁULICO

4.1 – Características gerais e concepção das obras

O circuito hidráulico do aproveitamento, dimensionado para um caudal de 24 m³/s, tem um desenvolvimento total de 10,7 km. A orografia muito acidentada do terreno entre a barragem e a central conduz à adopção para o circuito hidráulico de uma obra em túnel (em pressão) com um traçado em planta praticamente rectilíneo.

Relativamente ao traçado em perfil do circuito hidráulico colocaram-se diversas alternativas (Figura 7):

- Poço vertical seguido de túnel e conduta forçada (solução prevista nos estudos anteriores);
- Túnel seguido de conduta forçada;
- Poço vertical seguido de túnel fazendo a ligação directa à central.
- Túnel fazendo a ligação directa à central;

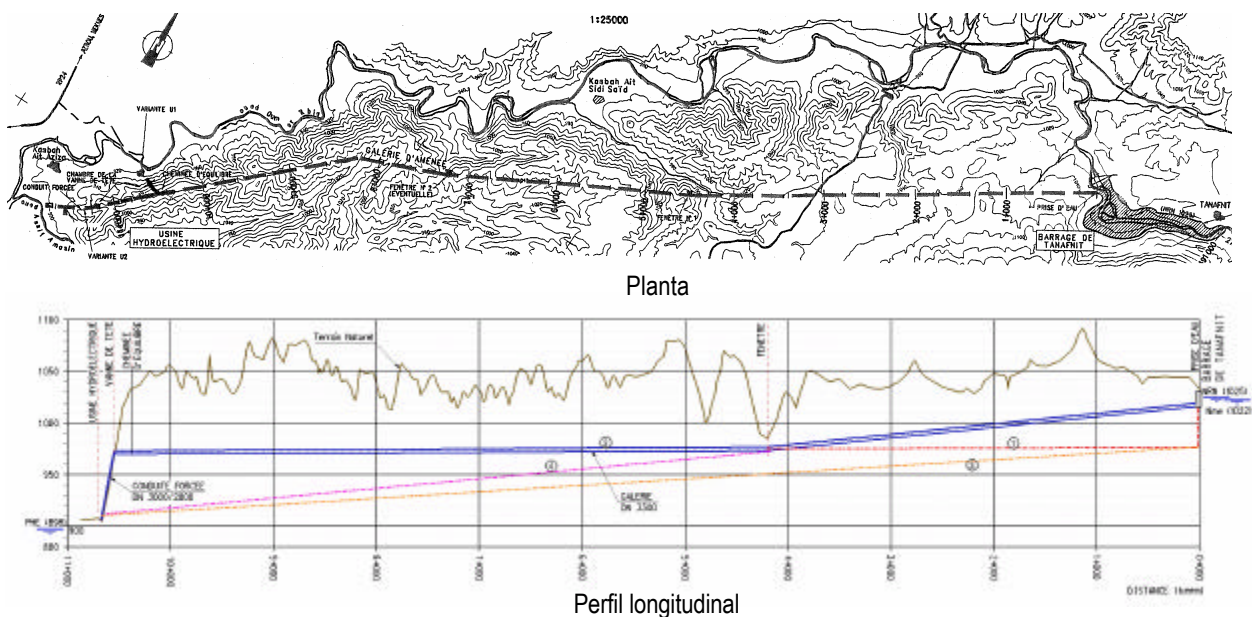


Figura 7 – Alternativas para o traçado do circuito hidráulico

As principais condicionantes a considerar dizem respeito ao custo da obra e prazo de execução, atendendo a que ela representa mais de metade do custo total do aproveitamento e condicionar o prazo global de execução.

Os traçados que se desenvolvem a maior profundidade atravessam, em teoria, zonas do maciços com melhor qualidade, o que beneficiaria as alternativas com início em poço ou com ligação directa à central (sem conduta forçada). Os resultados da prospecção geofísica e das sondagens realizada confirmam a melhoria das características do maciço em profundidade, contudo indicam também não existirem diferenças significativas entre as diferentes variantes, mesmo para aquela que se desenvolve a menores profundidades.

Os traçados que se desenvolvem a menor profundidade possibilitam a criação de um acesso num ponto intermédio do traçado, onde o túnel apresenta menor recobrimento, o que constitui uma vantagem importante para a redução do prazo de execução da obra. A necessidade de garantir acesso em diferentes frentes favorece também as variantes que não integram o poço vertical a montante.

Foi assim seleccionada a solução de túnel com traçado mais superficial, seguido de conduta forçada, que apresenta as seguintes vantagens relativamente às restantes alternativas:

- Possibilita a execução do túnel com quatro frentes de trabalho: emboquilhamentos a montante e a jusante e acesso num ponto intermédio do traçado;
- Minimiza a altura da chaminé de equilíbrio e assim o custo desta componente.
- O troço em conduta forçada é mais económico por metro linear do que túnel.

4.2 – Tomada de água

A tomada de água deverá assegurar boas condições de funcionamento, designadamente evitar a entrada de materiais sólidos incompatíveis com o tipo de turbinas, garantir que a entrada da tomada ficará livre de sedimentos e possibilitar o isolamento da galeria em caso de emergência ou para inspecção interior.

A solução definida nos estudos preliminares anteriores consistia na execução de uma torre de tomada de água na albufeira ligada à margem por um passadiço, equipada com grades de protecção, ensecadeira e uma comporta de segurança, não tendo sido prevista instalação de limpa-grelhas nem de desarenador.

A solução agora adoptada representa uma alteração significativa daquela solução sendo caracterizada pelas seguintes opções:

- Integração da estrutura da tomada da água no muro lateral esquerdo do descarregador de cheias, com orientação perpendicular à direcção do escoamento daquele;
- Implantação da entrada da tomada de água junto às comportas do descarregador, assegurando assim uma limpeza eficiente de sedimentos ou materiais flutuantes;
- Construção de uma bacia de retenção de sedimentos entre a entrada da tomada e a galeria cujo objectivo é reter os sedimentos de maior dimensão (areias grossas ou gravilhas) que possam causar danos ou desgastes excessivos nas turbinas.

A solução adoptada (Figura 8) compreende a entrada, no muro guia da margem esquerda do descarregador de cheias, a bacia de retenção e a estrutura de manobra da comporta vagão .

A entrada tem uma largura total de 6,40 m, com a soleira a uma cota 0,50 m acima do descarregador de cheias. É equipada com grade de protecção (6,40x6,34 m²) de espaçamento entre barras de 50 mm, duas ensecadeiras (3,20x5,00 m², em três elementos), limpa-grelhas automático e pórtico rolante. A bacia de retenção, com uma largura de 10 m, 18 m de comprimento e altura máxima de 19,4 m; foi dimensionada para reter partículas com dimensão superior a 1 mm. Possui fundo inclinado, duas aberturas de descarga de sedimentos equipadas comduas comportas vagão com 1,00x1,40 m². A entrada da galeria é obturada por uma comporta vagão com 2,60x3,20 m², manobrada

(Figura 9). No emboquilhamento de jusante, ao longo de 50 m, a secção interior do túnel é blindada, sendo a espessura de betão de 0,75 m.

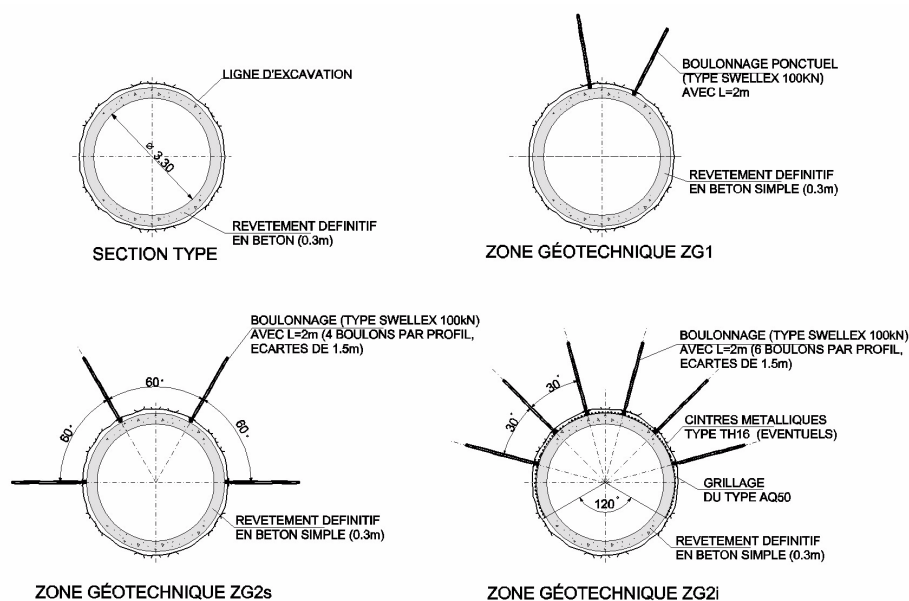


Figura 9 – Secção transversal da galeria de adução (construção por tuneladora)

Foram previstas injeções de consolidação, com excepção das zonas de melhor qualidade, e injeções para preenchimento de vazios entre o revestimento definitivo e a superfície de escavação. Foi previsto um revestimento provisório em betão projectado, simples ou reforçado com fibras metálicas, com espessura variável em função do zonamento geotécnico definido.

O traçado em planta é aproximadamente rectilíneo exceptuando-se o troço final na ligação à conduta forçada formado por uma curva de aproximadamente 45°. O traçado em perfil tem duas inclinações distintas, 1,018% e 0,055%, ambas na direcção de jusante. Numa secção intermédia do túnel é prevista a execução de uma galeria de acesso lateral, com cerca de 500 m de desenvolvimento.

4.4 – Chaminé de equilíbrio

A chaminé de equilíbrio do aproveitamento situa-se a cerca de 350 m da central, destinando-se a garantir adequadas condições de regulação dos grupos e a proteger o sistema hidráulico contra os efeitos do golpe de aríete em situações de arranque ou saída de serviço dos grupos. O dimensionamento da chaminé de equilíbrio foi determinado pela situação de funcionamento mais desfavorável da central, em que se previu o corte de 40% caudal nominal em 3 segundos.

É constituída por um poço de secção circular com diâmetro 5,5 m na zona superior e de 3,30 m na de ligação ao túnel, que se encontrará permanentemente submersa. A altura acima do terreno é de 17,0 m e a sua altura total é de 82,0 m (Figura 10). Na ligação à da galeria é previsto o estrangulamento da secção para o diâmetro de 1,13 m. O método de construção previsto é a escavação tradicional a partir da superfície. Soluções alternativas mecanizadas, que possibilitam uma maior rapidez de execução, são viáveis mas não foram consideradas economicamente interessantes atendendo a que não há restrições do prazo de execução desta obra. É previsto o revestimento definitivo em betão armado da totalidade do poço, com espessura constante de 0,50 m, sendo o revestimento provisório constituído por pregagens e betão projectado reforçado com fibras metálicas.

4.5 – Câmara de válvulas

Para protecção do circuito hidráulico em caso de rotura da conduta forçada, evitando o esvaziamento da galeria de adução, foi prevista a instalação de uma válvula na secção final da galeria, a montante da conduta forçada. A solução prevista nos estudos anteriores considerava a instalação da válvula a cerca de 100 m a montante da saída da galeria, que no seu troço final teria uma secção mais ampla de forma a dar acesso à câmara de válvulas subterrânea e possibilitar a instalação do troço inicial da conduta forçada. Na solução adoptada no projecto optou-se por manter a secção corrente da galeria até ao emboquilhamento de jusante, sendo a válvula de protecção instalada numa câmara exterior. Resulta assim uma solução mais simples, de menor custo e de fácil acesso (Figura 10). A válvula, com diâmetro 2 600 mm, será do tipo borboleta, com accionamento por servomotor e actuação automática comandada por detector de sobre-velocidade.

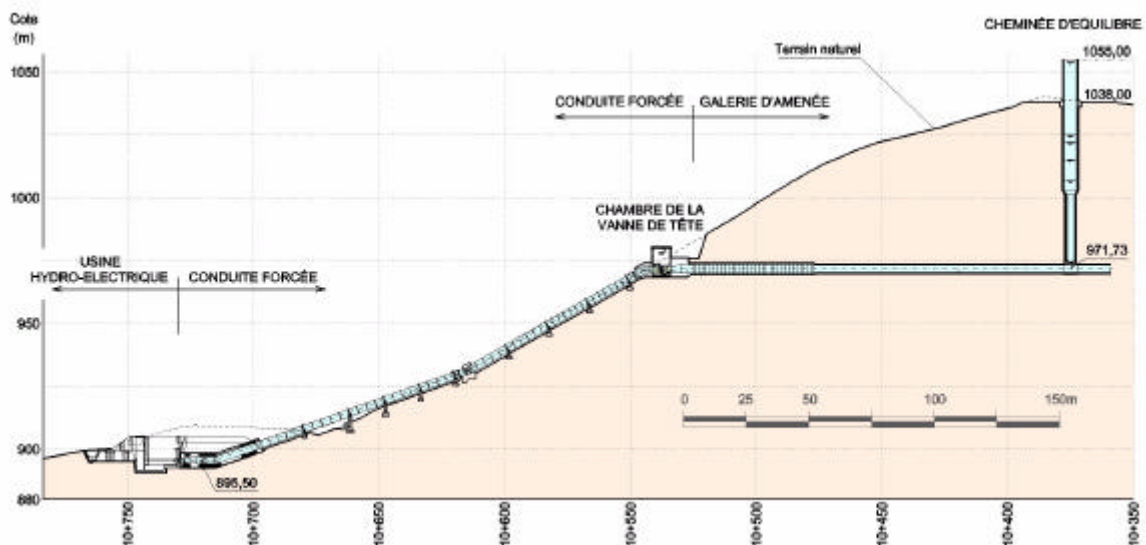


Figura 10 – Conduta forçada, chaminé de equilíbrio e câmara de válvulas

4.6 – Conduta Forçada

A conduta forçada desenvolve-se segundo a linha de maior inclinação da encosta entre a saída da galeria e o edifício da central, apresentando um traçado rectilíneo em planta e um desenvolvimento total de 206 m (Figura 10). Junto à central existirá uma bifurcação para ligação às turbinas.

À semelhança do túnel, a selecção do diâmetro da conduta forçada resultou de um estudo de optimização económica entre o custo de construção e o valor da perda de carga, tendo resultado diâmetros diferentes em função da pressão de serviço: 3000 mm a montante e 2800 mm a jusante.

A conduta será aérea, com amarração em maciços de betão nos pontos de mudança de direcção e em perfil e apoio em berços metálicos móveis com afastamento de 14 a 18 m. São previstas juntas de dilatação a jusante dos maciços de amarração e postigos de visita. A conduta será em aço S355 J2G3, com espessura variável entre 9 e 13 mm de montante para jusante, em função da pressão.

5 – CENTRAL HIDROELÉCTRICA

5.1 – Características gerais e condicionantes de concepção

A central hidroeléctrica está implantada na margem esquerda do rio, junto ao leito menor, num local em que o terreno apresenta inclinações mais suaves. Esta localização corresponde aproximadamente ao previsto nos estudos anteriores, tendo-se contudo afastado o edifício da zona de confluência de duas linhas de água que drenam a encosta adjacente.

O dimensionamento da central consistiu essencialmente na definição das características a adoptar para os grupos turbina-alternador, atendendo à tensão de geração e transmissão de energia e à possibilidade de funcionamento em rede isolada ou com interligação a uma rede local ou regional.

Nos estudos preliminares anteriores a solução prevista para os equipamentos da central consistia na adopção de um único grupo turbina-alternador tipo Francis de eixo vertical.

Nos estudos realizados definiram-se diversas alternativas de concepção da central, visando a optimização da solução a adoptar, e que consistiram em considerar as seguintes variantes:

- Instalação de 1 ou 2 grupos;
- Instalação de grupos de eixo vertical ou horizontal;
- Diferentes valores da velocidade de rotação e cota do eixo da turbina.

Para os valores de queda útil e caudal definidos, a instalação de um único grupo é a solução mais económica em termos de investimento. A necessidade de garantir a produção de energia na central durante períodos de indisponibilidade de grupos (programada ou não), conduziu à adopção de dois grupos. Considerou-se a instalação de dois grupos iguais do tipo Francis de eixo horizontal.

A velocidade de rotação seleccionada para esta instalação, em resultado dos cálculos realizados de consultas a diversos fabricantes, foi de 500 r.p.m. Esta velocidade, sendo relativamente baixa, resulta em grupos de maior custo mas de maior eficiência que exigem menor altura de aspiração. O custo de construção civil é menor, resultando globalmente uma solução mais económica comparativamente com velocidades de rotação mais elevadas.

5.2 – Descrição da solução adoptada

A central será implantada numa plataforma à cota 905 m a criar por escavação na margem esquerda do rio, que define um recinto com uma área de cerca de 4 000 m², envolvendo o edifício da central, sub-estação, caminhos de circulação e arranjos exteriores (Figura 12).

O edifício terá dimensões máximas em planta de 43,20 m por 37,20 m, e uma altura máxima de 25,35 m desde a fundação, sendo 11,0 m acima do nível da plataforma de acesso. Possui dois pisos principais, um, de acesso, à cota 905 m onde se encontra o hall de montagem e as instalações eléctricas e de pessoal, incluindo a sala de comando, e outro, à cota 896,20 m correspondente à sala dos grupos (Figura 13). As instalações anexas compreendem o hall de entrada, armazém, vestiários e W.C., sala de comando, sala de alta frequência, escritório, hall eléctrico, fossa e equipamento de drenagem, sala do grupo electrogéneo, sala de baterias, sala de disjuntores e sala dos filtros da ventilação. Os transformadores principais 10/60 kV ficarão situados no interior da sub-estação 60 kV anexa.



Figura 12 – Antevisão de implantação da central

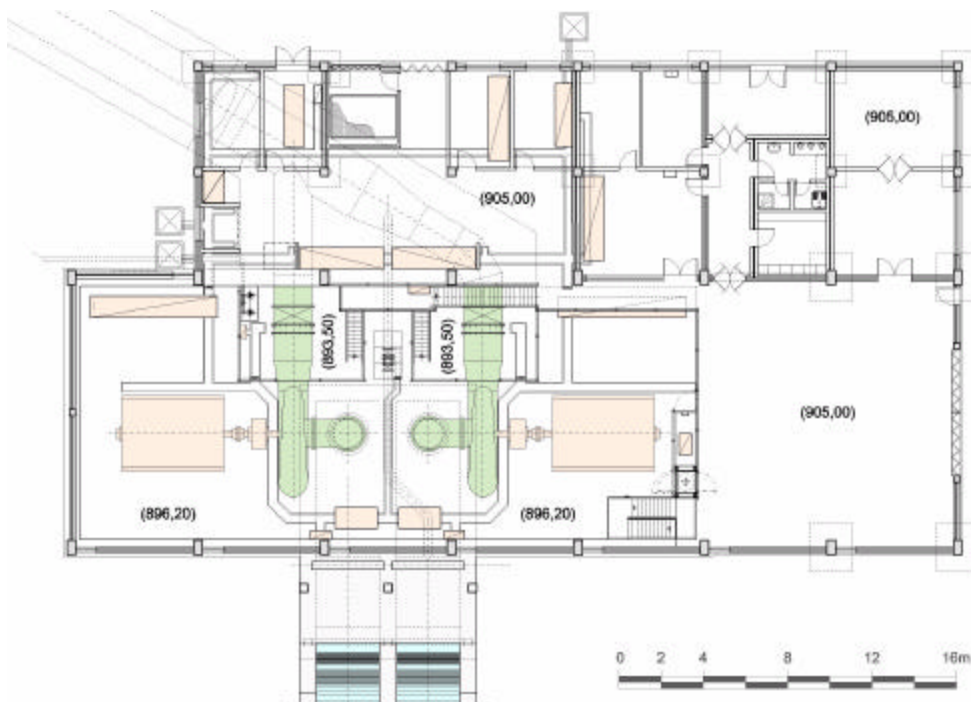


Figura 13 – Disposição dos equipamentos e instalações da central

5.3 – Equipamentos principais

O equipamento electromecânico principal será constituído por dois grupos turbina-alternador com 2x11,7 MW, duas válvulas borboleta de guarda de diâmetro 1800 mm, ensecadeiras de jusante, equipamentos eléctricos, ponte rolante, drenagem, ventilação e climatização, sistema de telecomando, material de luta contra incêndio e sistema de detecção de intrusão.

As turbinas serão do tipo Francis de eixo horizontal, com caudal nominal de 24 m³/s (2x12 m³/s) e uma queda útil média de 106,50 m. A velocidade de rotação nominal será de 500 r.p.m. Os dois alternadores são previstos para uma potência total de 26 MVA (2x13 MVA), sendo a potência da central entregue na rede de 21,3 MW.

Os equipamentos eléctricos a instalar serão: quadro de comando, equipamento de alta frequência, transformador dos serviços auxiliares, células de 22 kV e de 10 kV, quadro dos serviços auxiliares, quadros de comando dos grupos, grupo electrogéneo e baterias. O funcionamento é previsto em regime abandonado, com comando à distância a partir de um centro de comando existente ou da central a construir a montante.

6 – ACESSOS

No âmbito do projecto realizado foi prevista a execução de um total de 6,2 km de estradas de acesso e uma ponte sobre o rio Oum Er Rbia, com 43 m de vão total, situada junto à central. As estradas a realizar para acesso à barragem, central, câmara de válvulas e chaminé de equilíbrio serão revestidas com pavimento betuminoso, tendo uma largura total de 6,0 m, incluindo bermas. A estrada de acesso ao ponto intermédio da galeria não será revestida.

7 – ESTUDO HIDRÁULICO EM MODELO REDUZIDO

Os órgãos hidráulicos da barragem de derivação foram objecto de verificação através de ensaios em modelo reduzido, realizados no Laboratório LPEE em Casablanca. Os estudos (Figura 14) abrangeram o funcionamento de todos os órgãos hidráulicos da barragem, tendo incluído:

- Descarregador de cheias: funcionamento da soleira com e sem comportas e determinação das curvas de vazão e níveis de água no canal de descarga; funcionamento do salto de ski; e estudo da dissipação de energia e erosão.
- Descarga de fundo: funcionamento da comporta, determinação da curva de vazão, funcionamento da bacia de dissipação de energia.
- Tomada de água e bacia de retenção: escoamento na entrada, eficiência da retenção de sedimentos e funcionamento do sistema de descarga de sedimentos acumulados.

Destes estudos resultaram essencialmente as seguintes recomendações que foram incorporadas no Projecto para Concurso: i) definição das dimensões da pré-fossa de erosão a criar jusante do descarregador de cheias e protecção das margens e; ii) alteração da forma do fundo da bacia de retenção de sedimentos para melhoria da eficiência da retenção e descarga de sedimentos.



Funcionamento da soleira descarregadora



Funcionamento dado salto de ski do descarregador

Figura 14 – Ensaio em modelo hidráulico reduzido

8 – CONCLUSÕES

O aproveitamento hidroeléctrico de El Borj, situado no rio Oum Er Rbia em Marrocos, destina-se exclusivamente ao fornecimento de energia eléctrica. A central, com uma potência de 21,3 MW, permite garantir uma produção anual média de 108,6 GWh/ano. Este aproveitamento, embora com uma potência não muito elevada, integra obras de porte significativo cuja concepção e dimensionamento apresenta características específicas que o tornam interessante por se tratar de um projecto de engenharia tipicamente multidisciplinar.

A solução definida integra como obras principais uma barragem de derivação, um circuito hidráulico de adução e a central hidroeléctrica. A barragem de derivação, com uma altura de 25 m, e constituída por um corpo em aterro e um descarregador em betão com comportas sector de grandes dimensões, previstas para o caudal máximo de projecto de 1 100 m³/s. O circuito hidráulico do aproveitamento é composto pela tomada de água e por um túnel com 10,5 km de desenvolvimento. A central hidroeléctrica será equipada com dois grupos tipo Francis de eixo horizontal dimensionados para um caudal total de 24 m³/s.

O Projecto encontra-se actualmente em fase concurso para construção. Foram definidos 5 lotes para a construção: i) obras civis da barragem; ii) obras civis do circuito hidráulico; iii) equipamentos da barragem e circuito hidráulico, iv) obras civis e equipamentos da central e; v) estradas de acesso. prazo de execução global previsto é de 30 meses, condicionado essencialmente pela execução da galeria de adução. Os custos total de investimento estimado previsto são de 36,0 milhões de euros.