



4^{as} Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária
Angra do Heroísmo, 20 e 21 de Outubro de 2005

INTEGRAÇÃO DE UMA CENTRAL DE APROVEITAMENTO DA ENERGIA DAS ONDAS NOS MOLHES DO DOURO

F. Silveira Ramos

Consulmar – Projectistas e Consultores, Lda,
Av. Joaquim António de Aguiar, 27-9º, 1099-062 Lisboa
silveiramos@consulmar.pt

RESUMO

Depois de elencados os objectivos e condicionante que determinaram a intervenção das novas obras de melhoria das condições de acessibilidade e segurança da barra do Douro caracteriza-se a solução técnica seleccionada na sequência do concurso público internacional de concepção-construção, salientando-se o seu carácter inovador, tanto de um ponto de vista técnico (quebra-mar destacado, utilização de betão de alta densidade, molhe vertical cravado no fundo rochoso, etc.) como de um ponto de vista funcional (percurso lúdico sobre o Molhe Norte, acesso em galeria ao farol, preservação ambiental do Cabedelo) e explicando como, nesse contexto, apareceu e se desenvolveu a ideia de aí integrar uma central de aproveitamento de energia das ondas.

Faz-se uma breve descrição do estado actual dos conhecimentos e das experiências dos diferentes dispositivos hidrodinâmicos e sistemas electromecânicos de conversão existentes, com incidência para aqueles que permitem a utilização de quebra-mares como infra-estruturas de suporte das centrais, concluindo pela melhor adequabilidade dos dispositivos do tipo “Coluna de água oscilante”.

Apresentam-se os passos necessários para a determinação do recurso energético disponível e aplica-se ao caso do novo Molhe Norte da barra do Douro, concluindo-se pela presença de uma potência média disponível no local de 17 kW por metro de crista, com uma agitação muito concentrada na direcção W10°N e nas ondas entre 1 e 4 m de altura significativa.

Referem-se algumas alternativas consideradas quer para implantação e orientação das câmaras hidrodinâmicas de captação de energia quer para os equipamentos electromecânicos de conversão, descrevendo-se e justificando-se, finalmente, as soluções adoptadas caracterizadas pela utilização de duas câmaras hidrodinâmicas uma virada a NW e outra a SW e de duas turbinas Wells de cerca de 2 m de diâmetro para cada câmara, com uma potência instalada total de 1 200 kW e uma perspectiva de produção anual de energia entre 1 e 1,5 GWh.

1 – ANTECEDENTES

1.1 – Os objectivos e condicionantes da empreitada em curso

Com as suas múltiplas barragens e eclusas o rio Douro é hoje navegável por embarcações fluviais e fluviomarítimas, desde a sua foz até para lá da fronteira portuguesa, numa extensão de centenas de quilómetros. Apesar disso, ele não é “domesticado”. Nas suas grandes cheias (mais de 10 000 m³/s) galga as margens, inunda campos e cidades e vê o seu nível variar de mais de 15 m nalguns pontos do seu percurso.

A estabilização e protecção da embocadura era, desde há muito, um desejo das autoridades portuárias e das populações ribeirinhas. Algumas obras de correcção e protecção marginal



4^{as} Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária Angra do Heroísmo, 20 e 21 de Outubro de 2005

foram sendo realizadas, quer na margem direita (molhes de Felgueiras e Touro, protecção marginal da Cantareira, etc.) quer na margem esquerda (Molhe Luís Gomes de Carvalho), desde o início do século XIX.

A intervenção agora em curso tem, assim, como objectivo a resolução de velhos problemas:

- Proteger a zona urbana adjacente, fustigada pelas grandes tempestades marítimas do Atlântico Norte;
- Melhorar as condições de acesso marítimo na Barra para a navegação comercial, de pesca e de recreio;
- Estabilizar e reforçar a restinga arenosa (Cabedelo), em regressão e enfraquecida pela retenção de sedimentos nas barragens e nas obras marítimas a norte.

Além de responderem a estes velhos problemas, as soluções técnicas desta intervenção deveriam levar em consideração algumas novas condicionantes:

- Facilitar o escoamento das grandes cheias, não agravando as condições de inundação das margens a montante;
- Garantir a preservação ambiental do Cabedelo e da Bacia de S. Paio;
- Minimizar o impacto visual das intervenções sobre a adjacente zona urbana do Porto.

Depois de vários estudos e projectos a Administração lançou, em 2000, um concurso público internacional de concepção-construção para estas obras.

Apresentadas sete propostas por consórcios de várias nacionalidades, foram, numa primeira fase, seleccionadas as três melhores. Numa segunda fase, seleccionada a classificada em primeiro lugar e, numa terceira fase, foi esta proposta validada em modelos físicos, no Laboratório Nacional de Engenharia Civil, para confirmação das condições de abrigo e estabilidade, e efectuado o Estudo de Impacte Ambiental.

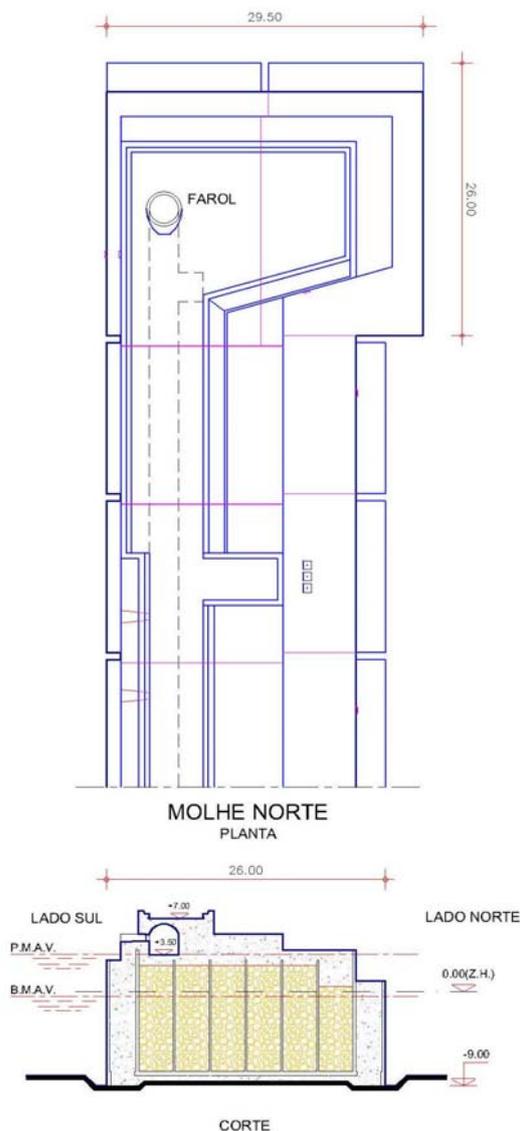
Todo este processo de concurso, desde o seu lançamento até à sua adjudicação, foi acompanhado por uma comissão independente, formada por técnica de reconhecida competência e idoneidade, e a solução finalmente seleccionada (apresentada pelo Consórcio Somague/Irmãos Cavaco) sujeita à discussão pública, nomeadamente em sessões abertas, quer organizadas pela Administração, quer pela sociedade civil do Porto e de Gaia.

1.2 – Concepção geral do Projecto e situação da empreitada

Um quebra-mar destacado, a sul, apoiado numa estrutura de contenção de areias, levará o Cabedelo a avançar, retomando posições mais perto das suas configurações históricas.

Um molhe norte, mais avançado que o actual, garantirá maior segurança à navegação. A sua conjugação com o quebra-mar destacado reduzirá a agitação incidente sobre as margens, tornando-as compatíveis com a utilização urbana.

Protegido pelo quebra-mar destacado o Cabedelo verá as dunas da sua parte terminal reduzirem a sua altura e serem assim mais facilmente galgáveis pelas grandes cheias. Isso terá reflexos positivos no escoamento dos maiores caudais e, portanto, nas condições de inundação das zonas urbanas marginais.



que as condições do mar o aconselhem, estando prevista a sua suspensão no período de Inverno.

1.3 – O projecto de investigação CEODOURO

Em meados de 2003 a Consulmar, em colaboração com o Instituto Portuário e de Transportes Marítimos (IPTM), o Centro de Energia das Ondas (CEO) e o Instituto Superior Técnico (IST), apresentou à Agência de Inovação um Projecto de I&D tendo por objectivo a análise do domínio das técnicas da extracção da energia das ondas e a viabilidade da sua aplicação à integração de centrais em quebra-mares. Fazia parte dessa proposta a aplicação a um caso concreto.

Tendo em consideração o estado de desenvolvimento dos estudos e projectos para as obras de melhoria da Barra do Douro, propôs-se que fosse esse o exemplo a considerar como caso de aplicação.

Fazia parte desse projecto de I&D a execução de ensaios em modelo físico de alguns aspectos condicionantes da geometria da central, nomeadamente as cotas de serviço da janela de captação de energia e as relações entre as características da agitação incidente e das pressões de ar e níveis de água no interior das Câmaras Hidropneumáticas.

De um ponto de vista estrutural também uma clara aposta na criatividade e na inovação tecnológica: a norte uma estrutura vertical, fundada no fundo rochoso; a sul uma estrutura em taludes, não acessível, constituída por blocos artificiais de dimensões reduzidas e de cor escura, conseguidas pela utilização de minério de ferro na composição de betões de alta densidade.

Esta aposta na criatividade e na inovação tecnológica é reforçada pela sugestão apresentada desde a primeira hora pela equipa projectista (que além da Consulmar integra o Eng^o Morim de Oliveira e o Arq^{to}. Carlos Pratas) de localizar na cabeça do Molhe Norte uma Central eléctrica de demonstração do aproveitamento da energia das ondas. Este objectivo reforça o conceito da utilização lúdica e urbana do Molhe Norte, alargando-o à utilização científica e, colocando seguramente o Porto no roteiro técnico-científico internacional.

O arrastamento de alguns aspectos processuais, ligados nomeadamente com os aspectos ambientais e sua interligação com o desenvolvimento do Projecto de Execução, levou a que os trabalhos efectivos de execução da Empreitada só fossem significativos a partir do início da Primavera deste ano de 2005.

No final do Verão estavam prefabricados a maior parte dos cubos Antifer de alta densidade para quebra-mar destacado, as aduelas e os caixotões que constituirão a infraestrutura da primeira metade do Molhe Norte. A colocação em obra destes elementos, iniciada no princípio do Verão, prosseguirá até



4^a Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária Angra do Heroísmo, 20 e 21 de Outubro de 2005

Este projecto foi formalmente aprovado no final de 2004, se bem que os estudos preliminares tenham sido efectivamente iniciados antes disso.

Já no decorrer deste Projecto de I&D, o IPTM convidou a Electricidade de Portugal (EDP) a juntar-se-lhe para esse objectivo, assumindo a vontade de se responsabilizar pela exploração da eventual central. Essa vontade veio a ser traduzida num Protocolo assinado entre as partes, no Verão de 2005, onde se prevê a análise conjunta da viabilidade técnica e financeira do empreendimento, com o objectivo imediato da tomada de decisão, em tempo útil, sobre a construção, ou não, da central, ou seja, a tempo de serem introduzidas alterações no projecto e na construção da cabeça do novo Molhe Norte da Barra do Douro.

Esta parceria foi inicialmente estabelecida com a Enernova (Eng^o Luís Braga da Cruz) e depois formalizada com a Labellec (Eng^o Luís Carrilho), ambas empresas do universo EDP.

Quer os ensaios físicos do LNEC, realizados sob a responsabilidade da Eng^a Graça Neves, quer os estudos preliminares efectuados pelo CEO (Prof. A. Sarmento e Eng^o Frank Neumann e Ana Brito e Melo), IST (Prof. A. Falcão e Prof. Luís Gato) e INETI (Dra. Teresa Pontes e Dr.^o Paulo Justino), foram elementos determinantes na análise de viabilidade técnica que uma equipa de técnicos da EDP liderada pelo Eng^o Ferreira da Silva elaborou muito recentemente para apoio à decisão.

2 – O APROVEITAMENTO DA ENERGIA DAS ONDAS

2.1 – Considerações gerais

Apesar de existirem, desde o final do século XVIII, vários conceitos e patentes sobre o modo de usufruir do potencial energético das ondas do mar, não foi no entanto considerado técnica e economicamente viável a sua exploração durante muito tempo.

Um factor que tem dificultado um desenvolvimento mais rápido deste ramo de tecnologia é a sua variedade tecnológica. É frequente a comparação com a energia eólica que depois de ter sido considerada não viável durante décadas, desenvolveu-se em poucos anos até atingir o nível actual, em que representa uma indústria forte e independente em vários países. Tal como para a energia das ondas, existiram vários protótipos daquela tecnologia nos anos 80, envolvendo custos muito elevados e apresentando vários problemas técnicos. No entanto, depois dos esforços terem convergido para o desenvolvimento de um tipo de gerador e de terem surgido alguns incentivos financeiros, a comercialização da energia eólica e dos seus equipamentos deu-se em grande escala.

Até à data, as tecnologias desenvolvidas com o fim de aproveitar o recurso energético das ondas marítimas a uma escala significativa percorreram duas fases distintas de desenvolvimento: A primeira fase resultou da crise petrolífera nos anos 70 e envolveu forte investimento industrial. Nesta fase vários dispositivos, alguns de grandes dimensões, chegaram a ser testados e instalados com êxito limitado. Foi sobretudo a estabilidade estrutural dos dispositivos que se revelou insuficiente para o ambiente a que se destinavam, possivelmente em resultado do curto prazo em que foram planeados e projectados e da falta de suficiente envolvimento da engenharia costeira no projecto global. Depois do insucesso de algumas centrais, cessaram praticamente as actividades relevantes, neste sector, durante vários anos.

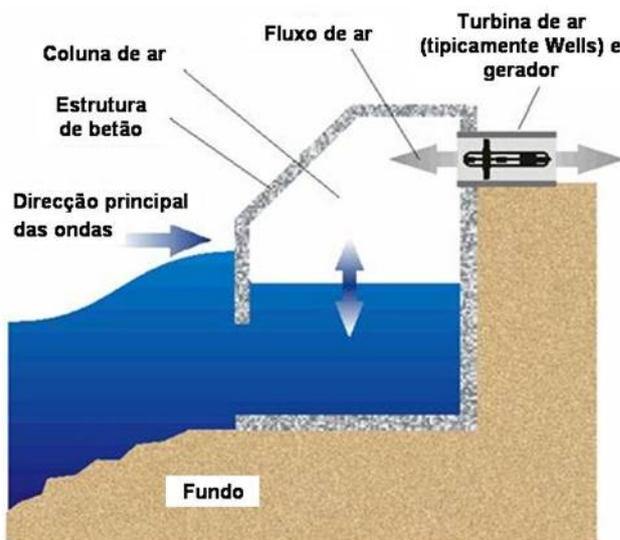
Entretanto, em resultado de extensas actividades de investigação e desenvolvimento (I&D) a nível mundial, vários dispositivos de energia das ondas chegaram a ser instalados como protótipo ou projecto de demonstração, podendo considerar-se que hoje algumas tecnologias de conversão estão numa fase pré-comercial. Foram encontrados vários problemas ao longo deste processo, relacionados sobretudo com a sobrevivência de dispositivos num ambiente marítimo agressivo e, conseqüentemente, com uma viabilidade económica limitada devido aos elevados custos associados à instalação dos sistemas. De facto, os riscos encontrados limitaram o desenvolvimento e a confiança na tecnologia até hoje, uma vez que, até à data, são poucos os dados existentes de centrais operacionais durante um período relevante.

Foi principalmente a grande preocupação ao nível político comunitário em aumentar rapidamente a quota de energias renováveis no final dos anos 90 e o contínuo aumento do custo dos combustíveis fósseis, que possibilitou a passagem à segunda fase, que decorre actualmente. Na fase actual estão a ser testados sistemas que encaram exactamente o aspecto de sobrevivência como prioridade.

2.2 – Dispositivos hidrodinâmicos e sistemas electromecânicos de conversão

Segundo as leis da física, qualquer processo de geração de ondas tem também a capacidade física de extrair energia destas. Os mecanismos propostos para converter, em energia útil a energia potencial e cinética que a onda transporta, são numerosos. Muitos dos dispositivos propostos baseiam-se em mecanismos relativamente simples cuja eficiência é reduzida. Contudo, alguns dispositivos recentes alcançam níveis mais elevados de eficiência aplicando métodos de optimização e de controlo avançados.

Os principais princípios de conversão referem-se ao aproveitamento i) das oscilações de corpos flutuantes ou mergulhantes, fixos ou não ao fundo do mar; ii) dos diferenciais de velocidade do movimento das partículas na propagação da onda; iii) da acumulação da água de galgamento de estruturas fixas ou flutuantes e iv) da transformação do movimento de oscilação das ondas em variações de pressão de ar numa câmara fechada (designado Coluna de Água Oscilante – CAO). Este último princípio é aquele que irá interessar para a aplicação nos molhes do Douro.



Esquema de funcionamento dos sistemas de Coluna de Coluna de Água Oscilante (CAO)

Concomitantemente com a variedade dos dispositivos propostos existem, também, inúmeras abordagens sobre grupos electromecânicos (PTO – Power-Take-Off System) para a conversão final da energia proveniente das ondas em electricidade. Os métodos de geração geralmente adequadas para a utilização em dispositivos de energia das ondas são (i) grupos propulsores mecânicos, (ii) grupos propulsores hidráulicos, (iii) grupos propulsores pneumáticos, (iv) geradores de indução linear, (v) piézo-electricidade e (vi) *condução* protónica (McCormick, 1981).

Enquanto os dois últimos métodos não foram utilizados em escala significativa até à data, existem diversas versões dos mecanismos dos tipos (i) a (iv). Na presente fase de desenvolvimento, já se estabeleceram alguns grupos de conversão, quer por serem adequados para um conceito particular, quer pela sua maturidade tecnológica e nível de confiança associado.

2.3 – Classificação dos dispositivos e sistemas

Existem diversas formas de descrever os mecanismos de conversão. Dentro destas destaca-se a classificação proposta por McCormick (1981), na qual os dispositivos são agrupados de acordo com as distinções entre os princípios básicos de conversão.

Teoricamente, parece ser mais correcto classificar os dispositivos através dos seus mecanismos básicos de conversão, como referido anteriormente. Na prática, esta classificação não parece ser a mais indicada, uma vez que a maioria dos dispositivos, sobretudo os que continuam a ser desenvolvidos presentemente, não podem ser enquadrados facilmente desta forma, uma vez que é frequente a combinação de mecanismos básicos. Uma outra forma possível de distinguir os dispositivos seria o sistema de conversão, que na prática também não se verificou realista, face às múltiplas propostas e soluções que continuam a surgir. Parece, assim, preferível distinguir os sistemas com base nas características do local da sua instalação.

- Sistemas construídos sobre a costa ('shoreline plants')

Os dispositivos costeiros revelam vantagens importantes pela facilidade de acesso, aspecto significativo em centrais piloto onde se pretende desenvolver investigação. Apresentam alguns inconvenientes nomeadamente, restrições em termos da sua localização, impacto visual e um nível de potência média das ondas mais reduzido, devido aos efeitos dissipadores da energia por rebentação e atrito no fundo. A localização de dispositivos deste tipo está em geral condicionada por requisitos quanto à orientação e às condições geomorfológicas da costa (boa exposição à direcção predominante das ondas, acesso fácil por terra, fundo rochoso, águas relativamente profundas na vizinhança imediata da costa).

Neste aspecto, as costas e ilhas vulcânicas (sem plataforma continental) apresentam vantagens para a instalação de centrais costeiras, comparativamente com regiões continentais, pelo que foi escolhida a ilha do Pico, nos Açores, como local para a construção da Central CAO Piloto Europeu. Outros exemplos de centrais sobre a costa são as centrais CAO 'Islay I' e 'Limpet'/ Escócia, Sanze/ Japão e Toftestallen/ Noruega.



Central Piloto Costeira na ilha de Islay, Escócia

Outra vantagem deste tipo de centrais é a ausência de amarrações ou cabos eléctricos longos (principalmente cabos submarinos, que representam custos significativos para o aproveitamento de energia marítima). É por estes motivos que, apesar de apresentar um potencial energético menor comparado com os outros dois tipos de dispositivos, os dispositivos sobre a costa constituem a maior parte dos sistemas realizados até à data.



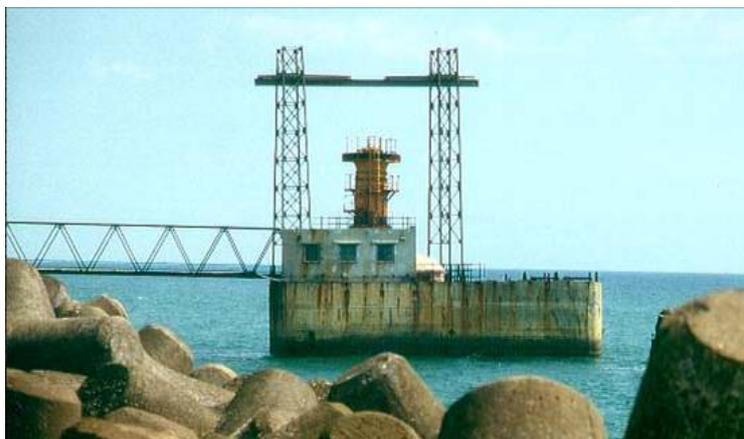
Central Piloto Costeira de Porto Cachorro na ilha do Pico, Açores

- Sistemas próximos da costa

Estes dispositivos representam a transição entre sistemas costeiros e sistemas no alto mar, não sendo, no entanto, muito clara a linha de separação. A forma de distinção usualmente mais adoptada tem sido a profundidade da água no local da instalação situar-se entre os 10 e os 25 m. Geralmente é entendido que um dispositivo próximo da costa é assente no fundo (nalguns casos esta característica é incluída na classificação) e, por vezes, incorporada em quebra-mares. Neste tipo de dispositivos é ainda relevante a orientação da agitação e as condições geomorfológicas do local, embora em menor grau do que para centrais construídas na costa.

O exemplo mais conhecido para dispositivos próximos da costa é o protótipo CAO Osprey, que foi projectado para ser assente no fundo em águas costeiras de 15 m de profundidade. Esta central foi destruída durante a sua instalação em 1996, devido a uma tempestade imprevista.

Considerando que as centrais integradas ou próximas de quebra-mares são geralmente incluídas neste tipo de sistemas, merecem menção as centrais CAO de Sakata/Japão, Vizhinjam/Índia e Port Kembla/Austrália.



Central Piloto integrada no molhe de abrigo do Porto de Vizhinjam, Índia



4^{as} Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária Angra do Heroísmo, 20 e 21 de Outubro de 2005



Central Piloto integrada na cabeça do molhe do Porto de Sakata, Japão

- sistema flutuantes, afastados da costa (ao largo)

Os dispositivos flutuantes instalados ao largo, além de permitirem explorar mais plenamente o recurso energético em águas de maior profundidade, não apresentam tantas restrições quanto à sua localização e têm certamente um menor impacto visual.

Contudo, estes dispositivos confrontam-se com várias dificuldades relacionadas principalmente com a sua manutenção, transporte de energia para terra e processos de ancoragem ao fundo. Estes aspectos são responsáveis por custos e riscos elevados, razões pelas quais a construção de protótipos deste tipo de dispositivos tem vindo a ser protelada. Diversas dificuldades tecnológicas impediram que tivessem atingido inicialmente o mesmo grau de desenvolvimento que os dispositivos fixos. Até há poucos anos, praticamente todos os protótipos construídos ou em vias de construção eram dispositivos sobre a costa ou perto da costa.

No entanto, o vasto potencial de energia das ondas cuja tecnologia tem sido alvo de um grande interesse na última década será, na grande maioria, aproveitado por este tipo de dispositivos, que parecem apresentar maiores vantagens económicas e ambientais.

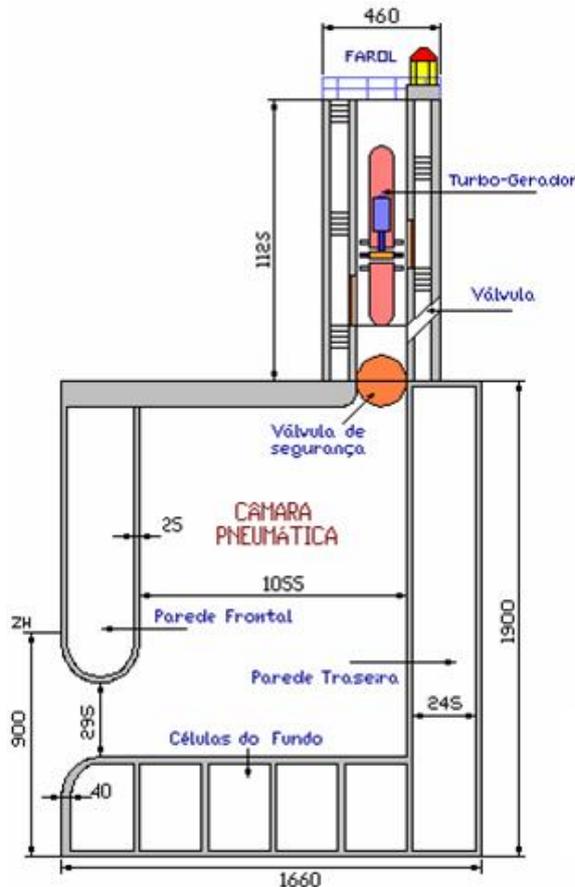
2.4 – As centrais em quebra-mares

Em termos da viabilidade técnica de dispositivos para converter energia das ondas pode-se talvez considerar que existem cinco tecnologias de conversão de energia das ondas que estão em fase piloto ou mesmo que já a ultrapassaram, nomeadamente a Coluna de Água Oscilante (CAO), o Archimedes Wave Swing (AWS), o Pelamis, o Wave Dragon e os sistemas de bóias. Entre estes dispositivos com grau de desenvolvimento relevante, a aplicabilidade para a instalação em quebra-mares é muito reduzida. Das cinco tecnologias acima mencionadas, somente a primeira apresenta, até à data, características favoráveis à instalação em quebra-mares.

Os dispositivos de coluna de água oscilante tipicamente consistem numa estrutura oca semi-submersa, de betão ou aço, com ar preso acima da superfície da água, formando uma 'câmara pneumática'. O movimento oscilante da superfície livre interna é induzido pelas ondas incidentes, forçando o ar preso na câmara através de uma turbina de ar, que tem saída para a atmosfera. A coluna de água interna oscila com a frequência da onda incidente, pelo que é necessário projectar as dimensões da câmara pneumática em relação ao período predominante das agitações mais relevantes para a conversão, com o fim de obter uma optimização do rendimento hidráulico.

O conceito da integração de dispositivos CAO em quebra-mares tem sido alvo de vários estudos no passado recente. A integração em quebra-mares verticais parece ser a solução

preferível neste estado tecnológico. A existência do projecto bem sucedido de Sakata / Japão provou a viabilidade técnica desta abordagem que, comparada com as outras alternativas estudadas ou realizadas, oferece, a curto prazo, uma maior confiança tecnológica e mais potencialidades. A integração em quebra-mares de taludes, formados por enrocamentos e blocos artificiais de betão, parece menos promissora ou então acaba por cair na solução anterior, por interposição de um ou mais caixotões onde ficam integradas as centrais.



Esquema geral da integração de uma central CAO num caixotão de configuração corrente em quebra-mares

Quase todas estas centrais utilizaram a turbina Wells, pelo que esta combinação (Central CAO – Turbina Wells) apresenta um certo avanço no domínio de tecnologia em relação aos outros dispositivos.

3 - RECURSO ENERGÉTICO DISPONÍVEL

3.1 – Considerações gerais

Os valores de agitação no local são determinantes, não só para o cálculo da produção energética (e conseqüente dimensionamento dos equipamentos electromecânicos associados), como também para o dimensionamento da estrutura da Central CAO. Os níveis energéticos do recurso da energia das ondas nos vários locais, a nível mundial, são normalmente estimados em potência média por unidade de largura ao largo, ou seja, sem ter em conta o efeito da difracção e refracção das ondas e a dissipação de energia, resultantes da propagação até ao local, em águas menos profundas. O valor médio anual de cerca de 30 kW (260 MWh) por metro de crista da onda ao largo estimada para a costa ocidental Portuguesa representa um valor elevado a nível europeu, facilitando assim a exploração deste recurso na fase pré-comercial da tecnologia. Além do valor médio anual, interessa também conhecer a variabilidade sazonal do recurso para avaliação de valores reais da produção energética no tempo. Enquanto um recurso médio muito elevado mas com variações sazonais extremas, dificultam o aproveitamento das potências mais elevadas, climas de agitação relativamente



4^{as} Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária Angra do Heroísmo, 20 e 21 de Outubro de 2005

constantes permitem um dimensionamento perto da potência máxima do recurso, sendo assim significativamente mais viáveis ao nível económico.

No caso de dispositivos construídos sobre a costa ou junto à costa, como é o caso de uma CAO integrada num quebra-mar, há dois factores adicionais que influenciam a informação do recurso disponível, nomeadamente a distribuição por rumos e a modificação das alturas das ondas devido à sua propagação em profundidades limitadas. O primeiro aspecto é importante por causa da orientação do dispositivo. Com efeito, contrariamente ao que sucede com os dispositivos ao largo, os dispositivos costeiros são fixos, não sendo possível variar a sua orientação consoante o rumo da agitação incidente. Por este motivo, a informação quanto aos rumos locais é muito mais relevante do que ao largo. A importância do segundo aspecto resulta da relação directa existente entre a altura e a energia da onda, tanto mais que a segunda varia aproximadamente com o quadrado da primeira.

A simulação da produção esperada de um determinado dispositivo exige, porém, dados mais pormenorizados, nomeadamente as ocorrências locais de pares de altura e período da onda incidente, por rumo. Esta informação adicional, muitas vezes dispensável no que respeita ao dimensionamento de obras costeiras 'clássicas', é essencial, tal como nos estudos de operacionalidade portuária, neste caso para a estimativa real da produção média anual de uma central de aproveitamento de energia.

3.2 – Informação ao largo e seu tratamento

Para a avaliação preliminar do recurso local e simulação da produção anual da CAO, foram utilizados os registos espectrais da bóia direccional da Figueira da Foz (FF), obtidos no período de Julho de 1990 a Dezembro de 1994, a uma profundidade de 92 m. Dada a profundidade de fundeamento da bóia e a sua proximidade geográfica do local da central, considera-se que as condições de agitação na bóia são representativas das condições ao largo da foz do Douro. Os registos foram obtidos a intervalos de 3 horas, excepto em situação de tempestade (altura significativa acima de 5 m), em que o intervalo passava a 1/2 hora. Os tempos de registo foram de 20 min. Foi registado um total de 8057 observações, apresentando numerosas falhas, sobretudo nos meses de verão marítimo de 1991 e 1994, e nos do inverno marítimo de 1993/94.

Estes dados foram sempre que possível aferidos com outras fontes de dados, nomeadamente o Ondatlas (baseado no hindcast de 10 anos de dados do Instituto Meteorológico) e duas actualizações do regime de agitação medido na bóia da FF (a última incluindo dados até Fevereiro de 1996, altura em que a bóia foi desactivada).

As observações foram transferidas para o local recorrendo a um programa de cálculo de refração espectral por leques inversos de raios de onda, desenvolvido pela CONSULMAR, no formato espectral completo, ou seja, considerando-se a distribuição de energias por frequência (medida na bóia) e por direcção (adoptando um espectro empírico, uma vez que a bóia não o permite medir). No espectro de frequência foram utilizadas 127 bandas e, no de direcções, 360. Para tratamento estatístico da informação obtida no local, foi necessário eliminar o conjunto de observações registadas em situação de tempestade, fora do intervalo de medição corrente (3 h), do que resultou um total de 7506 observações efectivas.

Para além da Potência das ondas, foram calculados os seguintes parâmetros de onda, em representação dos estados de mar observados:

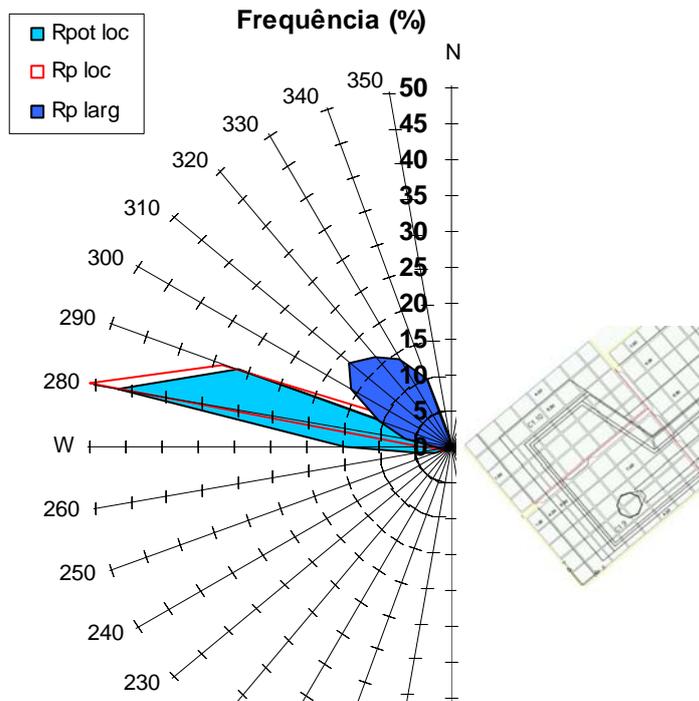
- Hs - Altura significativa
- Tz - Período médio de zero ascendente
- Te - Período médio de energia
- Tp - Período de pico
- Rvec - Direcção média vectorial
- Rpot - Direcção média de potência

R_p - Direcção no pico de energia

As fórmulas utilizadas são as normalmente referidas na bibliografia da especialidade.

3.3 – Rumo da agitação incidente no local

A agitação principal, que ao largo (gerada a médias-longas distâncias da costa) tem rumos no octante NW (cerca de 70 % do total, em sector de 45°), apresenta-se no local da barra do Douro rodada e concentrada em W10N, devido à refração nos fundos.



Rumos da agitação ao largo e no local, junto à cabeça do molhe norte da Foz do Douro.

O leque de direcções com que o molhe é atingido estende-se aproximadamente de NW a SW.

Verifica-se, no entanto, que quase 50% dessa agitação se concentra num sector de 10° centrado sobre a direcção local predominante (W10N)

A distribuição de frequências também é distinta, consoante o parâmetro direcção considerado, verificando-se uma maior concentração de rumos R_p em rumos mais a norte, o que traduz a preponderância que os estados de ondulação (maiores picos de energia) exercem neste tipo de parâmetro. Os rumos de potência são mais significativos, dado que integram de forma mais equilibrada, todos os estados de mar, através do peso da potência associada. Os rumos vectoriais (R_{vec}) e de potência são praticamente coincidentes.

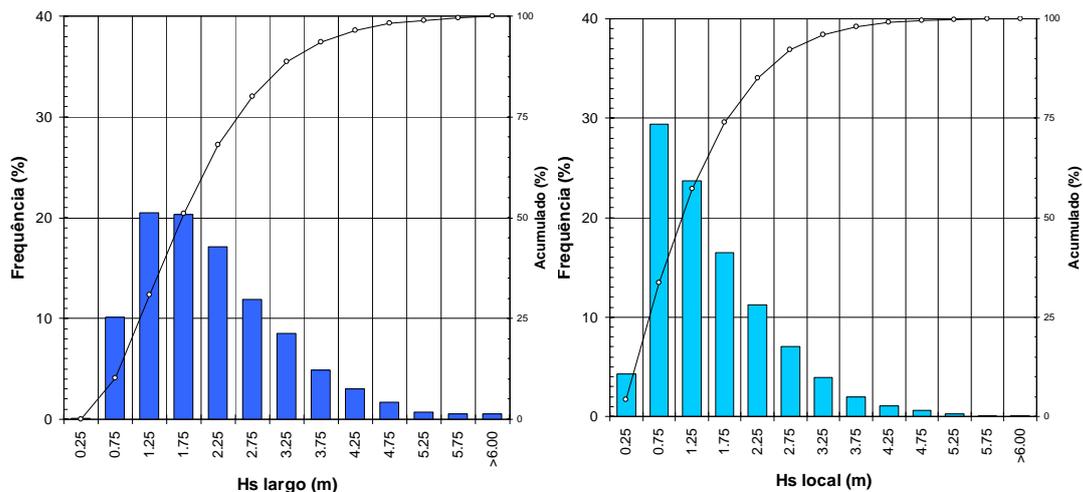
Outra observação importante é que os rumos principais no Verão e no Inverno marítimos variam pouco (a menos de uma ligeira rotação a norte no Verão), o que é um aspecto favorável à instalação da CAO, permitindo um aproveitamento mais uniforme do recurso disponível ao longo do ano.

3.4 – Altura das ondas no local

A agitação local exhibe uma altura média de 1,6 m, enquanto que ao largo esse valor é de 2,2 m. Tal deve-se à refração da agitação em fundos cuja batimetria de aproximação apresenta um pronunciado ângulo face ao principal rumo de incidência ao largo. Na figura seguinte apresenta-se a distribuição de frequências das alturas significativas, ao largo e no local.



4^{as} Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária Angra do Heroísmo, 20 e 21 de Outubro de 2005



Alturas significativas da agitação ao largo (esq.) e no local (dir.), junto à cabeça do molhe norte da Foz do Douro.

Em termos sazonais, verifica-se uma diferença acentuada entre os valores médios mensais, com alturas significativas médias locais de 1,8 m (2,4 m, ao largo) nos meses de Inverno marítimo, superiores às correspondentes nos meses de Verão, na ordem de 1,3 m (1,9 m, ao largo).

3.5 – Período das ondas no local

Normalmente, no cálculo da estabilidade de uma obra marítima, adopta-se para período de onda, o período de pico (T_p) ou, por vezes, o período médio (T_z). No entanto, no cálculo da energia das ondas é corrente a utilização do período de energia (T_e), o qual toma usualmente valores intermédios entre os de T_z e T_p (ver Fig. 3), não havendo entre os três uma relação directa.

No local, verifica-se a predominância de uma gama de períodos de energia relativamente alargada, entre 8 e 12 s, totalizando uma frequência de aproximadamente 60 %. De 7 a 13 s verificam-se 82 % das ocorrências. Não foram registados períodos abaixo de 4 s e muito raramente ocorrendo valores acima de 17 s.

3.6 – Potência disponível no local

Como referido anteriormente, para uma estimativa realista da produção média anual de uma central CAO fixa, é necessário conhecer a distribuição estatística conjunta de alturas e períodos, por rumo de incidência das ondas.

Na Tabela seguinte é apresentado o resumo da distribuição de frequências (%), em termos de alturas significativas e períodos de energia locais, para a totalidade dos rumos incidentes em frente ao novo Molhe Norte da Barra do Douro.



4ªs Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária Angra do Heroísmo, 20 e 21 de Outubro de 2005

Hs (m)	Te (s)																	Total	
	<4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9	9-10	10-11	11-12	12-13	13-14	14-15	15-16	16-17	17-18	18-19	19-20		>=20
0.25			0.33	0.85	1.13	1.11	0.44	0.31	0.05	0.01	0.01								4.25
0.75		0.27	1.17	3.94	5.76	6.14	4.45	3.40	3.08	0.84	0.17	0.09	0.03	0.01		0.01			29.36
1.25		0.03	0.51	1.17	2.65	3.85	4.54	4.28	3.73	2.07	0.63	0.23	0.04			0.01			23.73
1.75			0.08	0.41	1.04	1.28	2.56	3.34	3.46	2.60	1.19	0.32	0.12	0.11	0.01				16.52
2.25			0.01	0.09	0.77	1.04	1.31	2.21	2.16	1.73	1.19	0.45	0.17	0.03	0.04	0.01			11.22
2.75					0.16	0.57	1.12	1.23	1.35	1.15	0.92	0.32	0.17	0.01	0.04				7.03
3.25						0.19	0.47	0.75	0.81	0.72	0.52	0.33	0.07	0.04	0.01				3.90
3.75						0.01	0.12	0.28	0.44	0.37	0.41	0.17	0.08	0.03					1.92
4.25							0.01	0.07	0.24	0.19	0.21	0.19	0.16		0.01				1.08
4.75							0.01	0.01	0.05	0.15	0.13	0.07	0.09	0.05	0.04				0.61
5.25									0.05	0.07	0.01	0.01	0.04	0.03	0.01				0.23
5.75									0.03	0.01		0.01	0.03	0.01					0.09
6.25										0.01			0.03	0.01					0.05
Total		0.29	2.10	6.47	11.51	14.19	15.03	15.87	15.45	9.91	5.40	2.20	1.03	0.33	0.17	0.04			100

Distribuição conjunta das frequências de ocorrência (%) de Hs e Te no local.

Multiplicando as frequências de ocorrência dos estados de mar pelas potências instantâneas associadas, obtém-se as respectivas potências médias, cuja soma constitui o recurso energético bruto disponível na Foz do Douro.

Hs (m)	Te (s)																	Total	
	<4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9	9-10	10-11	11-12	12-13	13-14	14-15	15-16	16-17	17-18	18-19	19-20		>=20
0.25			0.00	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00								0.03
0.75		0.00	0.02	0.07	0.13	0.17	0.14	0.11	0.11	0.03	0.01	0.00	0.00	0.00		0.00			0.81
1.25		0.00	0.02	0.07	0.17	0.25	0.34	0.34	0.31	0.19	0.06	0.02	0.00			0.00			1.78
1.75			0.01	0.05	0.13	0.17	0.37	0.53	0.58	0.44	0.22	0.06	0.02	0.02	0.00				2.60
2.25			0.00	0.02	0.16	0.24	0.31	0.57	0.58	0.48	0.34	0.14	0.05	0.01	0.01	0.00			2.91
2.75					0.05	0.20	0.41	0.46	0.54	0.47	0.39	0.14	0.08	0.01	0.02				2.77
3.25						0.09	0.24	0.40	0.46	0.41	0.31	0.21	0.04	0.02	0.01				2.18
3.75						0.01	0.08	0.20	0.32	0.28	0.32	0.14	0.07	0.02					1.45
4.25							0.01	0.06	0.23	0.18	0.21	0.20	0.17		0.02				1.08
4.75							0.01	0.02	0.06	0.18	0.17	0.08	0.13	0.07	0.05				0.78
5.25									0.07	0.10	0.02	0.02	0.06	0.04	0.02				0.34
5.75									0.05	0.02		0.02	0.05	0.03					0.17
6.25										0.03			0.06	0.03					0.12
Total	0.00	0.00	0.05	0.21	0.65	1.13	1.92	2.68	3.32	2.82	2.05	1.04	0.74	0.25	0.13	0.01	0.00	0.00	17.01

Potência média local (kW/m) dos estados de agitação incidente.

A potência média disponível no local é assim de 17 kW/m (150 MWh/m), sendo que cerca de 80% desse valor se situa em ondas de Hs entre 1 e 4 m e Te entre 7 e 16 s. Salienta-se que os valores indicativos acima apresentados, potência bruta disponível à entrada da central, não devem ser confundidos com a capacidade de produção efectiva anual da central. O rendimento global da central resultará do produto dos factores de conversão em energia eléctrica (envolvendo o ângulo de incidência, altura e período das ondas, perdas de conversão hidrodinâmica → pneumática, pneumática → mecânica e mecânica → eléctrica) e ainda de outros factores relacionados com o funcionamento da central como, por exemplo, os períodos de inoperacionalidade.

4 – CARACTERIZAÇÃO DA CENTRAL C.A.O. DO DOURO

4.1 – Condicionantes e concepção geral

A localização proposta para a integração da CAO no novo molhe norte da Foz do Douro é, como se disse anteriormente, a sua cabeça. Em todo o molhe, este é o local que melhores condições reúne para o aproveitamento do recurso disponível, devido à sua maior profundidade e exposição.

Dadas as dimensões necessárias para um aproveitamento hidrodinâmico razoável das características de agitação existentes, a câmara hidropneumática (CHP) deverá ocupar uma grande parte do volume do caixotão da cabeça, pelo que é essencial a existência de opções estruturais adequadas para compensar a diminuição de peso e de resistência devidas à estrutura oca da CAO.

As dimensões gerais dos caixotões são, neste caso, um dado do problema, uma vez que a empreitada se encontra já em início de execução. Assim, foram analisadas duas alternativas estruturais principais quanto à orientação da abertura.

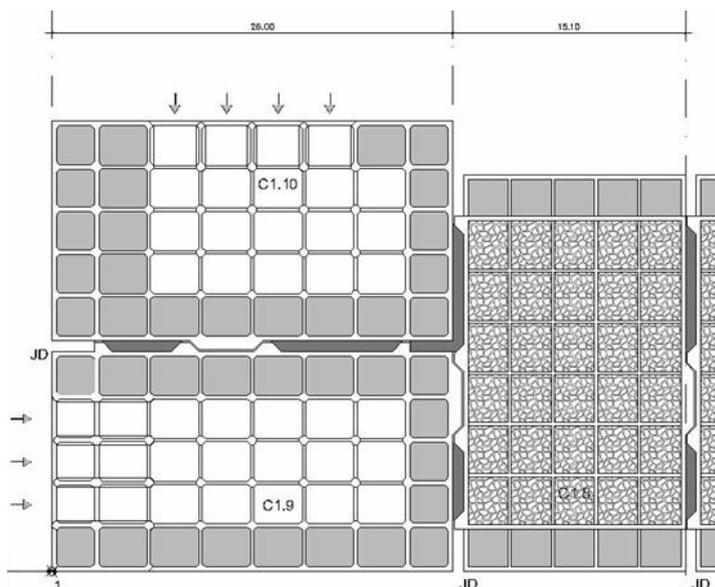


Alternativas da integração da CAO na cabeça do molhe; 1) abertura paralela ao corpo do molhe (esq.), 2) abertura ortogonal ao corpo do molhe (dir.)

Como é visível nesta figura, as dimensões das câmaras são condicionadas pela configuração do caixotão base, resultando numa CHP mais larga e menos comprida para a alternativa 1 e numa CHP mais estreita e mais comprida, para a alternativa 2. Assumindo-se a necessidade de utilizar pelo menos a linha exterior de células do caixotão como reforço estrutural, existirá um anel de células preenchidas com betão de cerca de três metros de espessura à volta da CHP.

Depois de analisadas várias configurações alternativas, opta-se por uma solução envolvendo duas câmaras hidro-pneumáticas. Uma das câmaras terá a abertura paralela ao corpo do Molhe, na maior dimensão do caixotão e a outra terá a abertura ortogonal ao corpo do Molhe, ou seja na menor dimensão do caixotão.

Esta configuração e orientação das CHP significa que não é alterada a implantação prevista no projecto inicial para os dois caixotões da cabeça do molhe e que uma das câmaras será aproximadamente virada a NW e a outra a SW. Tendo em atenção que a perda de eficiência da captação de energia quando a agitação se apresenta de direcção até, pelo menos, 45° é muito pequena, esta orientação é especialmente vantajosa por maximizar a utilização das duas câmaras para a direcção predominante de incidência das ondas (W10N).



Configuração seleccionada para configuração e orientação das câmaras hidropneumáticas da central

Vários factores exigem consideração cautelosa no que diz respeito ao funcionamento da CAO e condicionam fortemente a sua configuração geométrica. Nomeadamente:



4^{as} Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária Angra do Heroísmo, 20 e 21 de Outubro de 2005

- O desenvolvimento das pressões do ar interior da câmara, sobretudo as pressões máximas expectáveis, com o fim de dimensionar as paredes da CHP, as válvulas e outros equipamentos;
- Os níveis de água no interior da câmara, com o objectivo de definir a condição de fecho do acesso à turbina em caso de agitação forte, e no exterior da câmara, com o objectivo de avaliar os estados do mar nos quais possivelmente pode entrar ou sair ar da CHP de forma não controlada;
- A dimensão e posição da abertura da CHP para o mar, tendo em conta os efeitos acima descritos, o rendimento hidrodinâmico (simulado) da central e os constrangimentos de resistência e do processo construtivo;
- A entrada da turbina deve ser colocada em posição tão recuada e sobrelevada quanto possível, relativamente à CHP. Desta forma, o grupo turbina-gerador ficará mais protegido das agitações extremas com condições de galgamento do molhe;
- Um aspecto crítico da configuração das câmaras é o percurso do ar pressionado da CHP até à entrada da turbina. A aerodinâmica deste percurso deve ser analisada cautelosamente, uma vez que condicionará a configuração da localização, dos equipamentos. Turbulências na vizinhança da entrada da turbina prejudicam gravemente o seu funcionamento, representando perdas de rendimento significativas e ameaças para a durabilidade dos materiais e equipamento;
- Deve-se prever uma válvula de controlo, para limitar a pressão de ar interna na CHP. Espera-se que este elemento permita, por um lado, impedir o crescimento demasiado de pressões e assim evitar condições de perda de velocidade não controlada da turbina ("stall") e impedir pressões excessivas durante estados de agitação elevados, que poderiam pôr em causa a estabilidade estrutural ou a resistência do grupo electromecânico;
- O interior da CHP deverá ser acessível a pessoas e equipamento leve, condicionado a estados de agitação pouco energéticos. Este aspecto é considerado importante por três motivos: possibilitar a inspecção, manutenção e pequenas reparações do equipamento, sem ter que aguardar estados de mar de total acalmia, muito raros neste local; facilitar o acesso com equipamento leve para limpeza e remoção de objectos que entrem na CHP (destroços, sedimentos, pedras, redes de pesca, lixo, etc.); permitir a entrada de visitantes qualificados, tendo em conta a componente de demonstração científica e educacional inerente a este projecto.

4.2 – Equipamento electromecânico

De acordo com os últimos estudos de avaliação da energia produtível e de definição preliminar dos grupos, cada câmara alimentaria duas turbinas.

O grupo gerador previsto é de velocidade variável, composto por uma turbina pneumática do tipo Wells directamente acoplada a um gerador assíncrono, contribuindo a roda da turbina para o volante de inércia necessário à atenuação das oscilações de potência.

De modo a maximizar a produção de energia, a velocidade de rotação será ajustada através de um sistema de controlo, em princípio, do tipo SRED (Sistema de Recuperação de Energia de Deslizamento), idêntico ao adoptado na Central Piloto da Ilha do Pico.

O sistema é baseado na ligação rotor do gerador assíncrono à rede através de conversores electrónicos de potência. Parte da energia produzida é entregue à rede através do estator sem passar pelos conversores.

A potência injectada na rede ao dobro da velocidade de sincronismo é, pois, dupla da potência estipulada do gerador. Assim, para uma potência injectada na rede de 1000 kW e duas turbinas por câmara pneumática, cada um dos 4 geradores terá a potência de 125 kW. A potência estipulada unitária dos conversores electrónicos de potência é, também, de 125 kW.



4^{as} Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária Angra do Heroísmo, 20 e 21 de Outubro de 2005

A ligação à rede pública será efectuada ao nível dos 15 kV, através de um ramal subterrâneo e a central será operada a partir do edifício de apoio no enraizamento do molhe e remotamente.

A turbina Wells e a válvula de alívio são os dois componentes principais do equipamento mecânico. São componentes não convencionais que requerem ainda algum desenvolvimento.

A turbina Wells prevista corresponde à configuração típica, com rotor monoplano e duas fiadas de pás directrizes, uma de cada lado do rotor. Na hipótese considerada de duas turbinas por câmara, o seu diâmetro será de 2,1 m.

A protecção da turbina será, em princípio, assegurada por uma válvula de borboleta accionada por actuador eléctrico e contrapeso, intercalada na conduta de admissão.

O gerador será assíncrono, trifásico de rotor bobinado, de tensão estipulada igual a 400 V e de 8 pólos, variando a velocidade de rotação entre 750 e 1500 r.p.m.

A concepção do sistema de conversão previsto para a central da Foz do Douro incorporará a experiência entretanto adquirida com a experiência da central do Pico e com o desenvolvimento do módulo de potência para conversores de energia eólica, pelo que difere do sistema instalado na central do Pico.

O módulo de controlo do sistema será programado para, em função da informação do estado do mar, ajustar a velocidade da turbina e atenuar a oscilação de velocidade do grupo e da potência fornecida à rede, através do controlo do binário electromagnético, ou seja, da potência a retirar do rotor pelos conversores.

Na configuração prevista para a central, distinguem-se a sala das máquinas sobre a super-estrutura dos caixotões e o edifício de apoio no enraizamento do molhe, ligados por uma galeria interior ao longo do molhe, que possibilitará a passagem dos cabos de potência e de comando e controlo.

No interior da sala das máquinas ou em sala contígua será instalada uma interface da instrumentação de monitorização dos grupos geradores e das câmaras pneumáticas.

Os restantes equipamentos serão abrigados no citado edifício de apoio no enraizamento do molhe que, em princípio, compreenderá 4 salas: sala dos transformadores, sala de quadros (monobloco de 15 kV, quadro de baixa tensão, incluindo conversores, quadro de comando e controlo e sistema de corrente contínua), sala de comando e sala da EDIS (equipamento de telecontagem).

4.3 – Energia produtível

Os primeiros estudos efectuados na altura do lançamento da ideia da construção da CAO na Foz do Douro, no ano de 2000, apontavam para uma energia produtível da ordem de 0,7 GWh/ano na câmara virada a noroeste para uma potência instalada de 500 kW por comparação dos climas de ondas no Pico e na Foz do Douro. Mais recentemente, em Janeiro do corrente ano, o IST completou aquela avaliação com a estimativa da produção na câmara virada a sudoeste, que situou em cerca de 70 % da produção na outra câmara, ou seja, em cerca de 0,5 GWh/ano para a mesma potência instalada.

Os referidos estudos sugeriam assim uma energia produtível total de 1,2 GWh/ano para uma potência instalada de 2 x 500 kW.

Entretanto, e em paralelo com os ensaios hidrodinâmicos no LNEC no âmbito do CEODOURO, empreendeu-se nova avaliação da energia produtível com base num modelo estocástico de conversão de energia, embora limitada à câmara com abertura virada a noroeste. Os dados de entrada do modelo são o clima de ondas, os coeficientes hidrodinâmicos da câmara pneumática e as características do grupo turbina-alternador e dos conversores.

A avaliação efectuada conclui que o diâmetro económico de uma única turbina se situaria em torno de 3 m, com uma potência equivalente bruta produtível de 102 kW (0,894 GWh/ano) num cenário 1 e de 95 kW (0,832 GWh/ano) num cenário 2, ambos algo superiores aos estimados no ano de 2000 (0,7 GWh/ano).

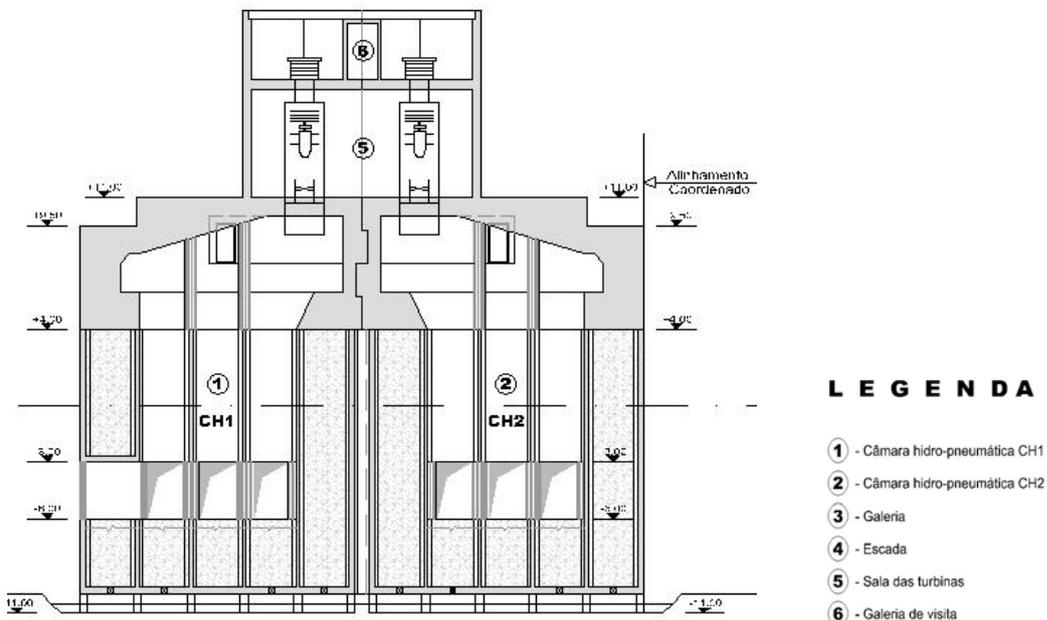
A avaliação aconselha a utilização de duas turbinas por câmara não só por razões construtivas (o diâmetro óptimo seria superior ao diâmetro de 2,3 m da turbina do Pico e mesmo ao diâmetro de 2,6 m das turbinas do Limpet) mas também de modo a incrementar a flexibilidade e disponibilidade da central.

Para a mesma potência equivalente bruta produtível, o diâmetro de cada uma das duas turbinas a instalar em cada câmara é da ordem de 2,1 m. Uma só turbina na câmara produz uma potência equivalente de 77 kW e 73 kW, respectivamente nos cenários 1 e 2, ou seja, cerca de 76 % da produzida por duas turbinas.

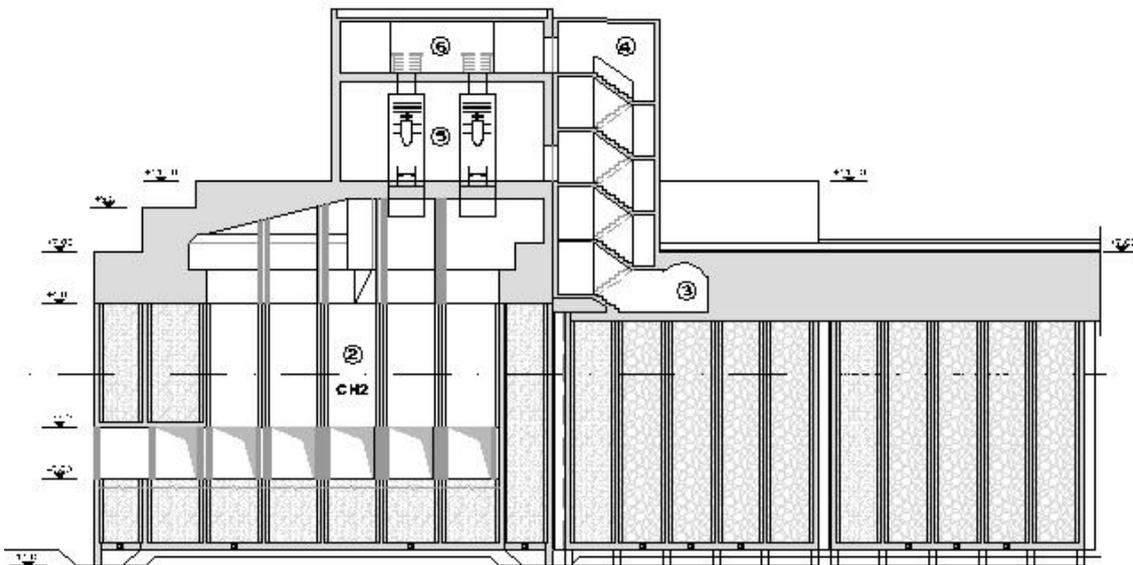
O referido nos parágrafos anteriores sobre construção das turbinas, flexibilidade e disponibilidade da central e energia produtível e o facto de se tratar de um projecto de demonstração, com uma forte componente de I&D, conduziu assim à opção de duas turbinas por câmara e à consideração da sua instalação de forma faseada, englobando a primeira fase apenas duas turbinas, uma por câmara, mas com possibilidade de ensaio em alternativa da instalação dessas mesmas duas turbinas na mesma Câmara.

4.4 – Configuração geométrica da Central

A conjugação das características geométricas dos caixotões que constituem a cabeça do molhe e que estão predefinidas no projecto da empreitada actualmente em execução, com as condicionantes de operacionalidade e segurança de uma central tipo coluna de água oscilante e com a tentativa de otimizar a produção de energia e os seus custos, conduziram finalmente à geometria geral apresentada nas figuras seguintes.



Corte transversal na cabeça do molhe



Corte longitudinal do molhe

Esta nova configuração geométrica é essencialmente caracterizada pela elevação da cota geral da cabeça do molhe, em cerca de três metros, de modo a alojar as duas câmaras hidrodinâmicas e na transformação do cilindro de cerca de 9 m de altura e 3 m de diâmetro que suportaria o Farol, num outro com a mesma altura e cerca de 13 m de diâmetro, capaz de alojar no seu interior as quatro turbinas.

A solução encontrada é ainda caracterizada, de um ponto de vista operacional, pelos seguintes aspectos a salientar:

- A utilização simultânea de duas câmaras hidrodinâmicas, a operar de modo conjugado, o que corresponde a um salto qualitativo em relação às centrais CAO existentes;
- A localização das janelas das câmaras que, fazendo um ângulo de 90° entre elas, permitem otimizar o tempo total de funcionamento da central e a quantidade de energia produzida, captando energia de todas as direcções de agitação presentes no local;
- A segurança de operação e manutenção, conseguida pela localização dos principais equipamentos e comando e controlo no enraizamento da obra e pela acessibilidade, por túnel, em qualquer estado de mar, à casa das turbinas e à sala de comando avançado;
- A elasticidade de observação, monitorização, manutenção e reparação das instalações, conseguida pela acessibilidade terrestre e eventualmente marítima e pela possibilidade de intrusão controlada na câmara, mesmo em estados de agitação relativamente energéticos;
- A facilidade de montagem e desmontagem das turbinas, geradores e válvulas nas operações de instalação e substituição com utilização de grua automóvel e entrada superior na casa das turbinas;
- A possibilidade de utilização da central também como instalação de ensaio de turbinas, aproveitando a oportunidade de permuta fácil da sua localização nas câmaras;

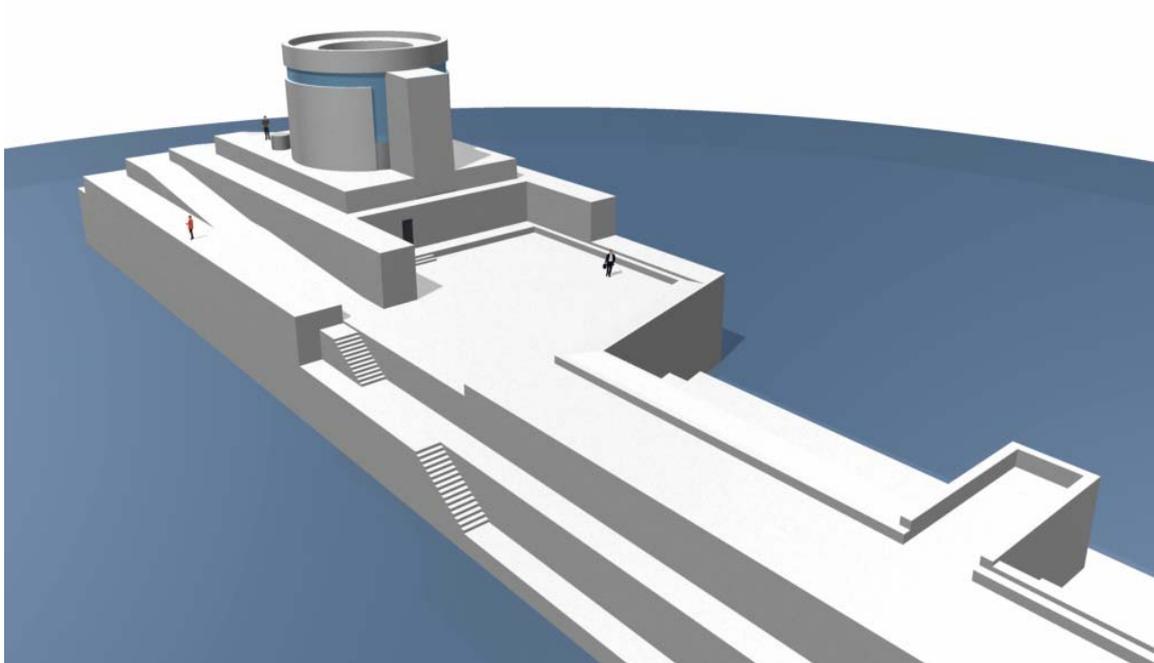


4^{as} Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária Angra do Heroísmo, 20 e 21 de Outubro de 2005

- A conjugação da casa das turbinas como suporte do farol e como ponto privilegiado de observação panorâmica da cidade e do rio.

Vários problemas e pormenores estão em fase de estudo e podem conduzir ainda a alterações significativas quer na configuração geométrica quer na caracterização dos equipamentos electromecânicos, de controlo e de monitorização.

Preocupação especial vai continuar a ser dada a nível de Projecto á qualidade da obra, tendo em vista a sua valorização como equipamento urbano e de demonstração tecnológica.



Visão artística do que poderá ser a nova cabeça do Molhe Norte da Barra do Douro, com uma central de aproveitamento da energia das ondas incorporada.