

AVALIAÇÃO DO POTENCIAL ENERGÉTICO DAS MARÉS NO ESTUÁRIO DO RIO DOURO

ANDRÉ DE LIMA ABREU

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de

**MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL
ESPECIALIZAÇÃO EM HIDRÁULICA, RECURSOS HÍDRICOS E AMBIENTE**

Orientador: Professor Doutor Francisco de Almeida Taveira Pinto

Co-Orientador: Professor Doutor José Luís da Silva Pinho

SETEMBRO DE 2010

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2009/2010

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ miec@fe.up.pt

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440

✉ feup@fe.up.pt

🌐 <http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2009/2010 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2010*.

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respectivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão electrónica fornecida pelo respectivo Autor.

À minha família, amigos e aos educadores deste meu caminho.

"tenta deixar o mundo um pouco melhor do que o encontraste"

Robert Baden-Powell

AGRADECIMENTOS

Sendo este trabalho o culminar do meu percurso académico, agradeço a todos que me acompanharam estes anos, em especial aos amigos que encontrei nesta Faculdade.

Não poderia deixar de prestar os mais sinceros agradecimentos a todos que directa ou indirectamente contribuíram para a realização deste trabalho, nomeadamente ao Professor Francisco Taveira Pinto na qualidade de orientador do trabalho sem o qual este seria impossível de realizar.

Ao Professor Luís Pinho da Universidade do Minho, na qualidade de co-orientador, pela total disponibilidade para esclarecer dúvidas e apresentar sugestões que se demonstraram fundamentais para o sucesso do trabalho.

Ao Engenheiro Adélio Silva da Hidromod pela sua ajuda fundamental no do arranque do trabalho.

Ao Professor Ramiro Neves, do MARETEC, Instituto Superior Técnico, e aos seus colaboradores Engenheiros Rodrigo Fernandes e Madalena S. Malhadas, pela disponibilidade, esclarecimento de duvidas e sugestões que contribuíram decisivamente para a execução do modelo hidrodinâmico.

RESUMO

A análise de novas soluções energéticas de fontes renováveis é actualmente um objectivo de grande relevância no caminho da sustentabilidade. A presente dissertação envolveu a análise do potencial energético das marés no estuário do rio Douro através da construção e aplicação de um modelo hidrodinâmico para a zona em estudo.

Efectuou-se também uma análise do estado da arte referente aos equipamentos e tecnologias existentes para a produção de energia através das correntes de maré.

A modelação computacional do estuário foi realizada através do software MOHID, tendo como base uma compilação de dados da batimetria do estuário médio e inferior cedidos pela APDL, sendo a restante parte relativa à zona entre a Ponte do Freixo e a Barragem de Crestuma-Lever linearizada considerando a existência do canal de navegação. O estuário foi delimitado tendo como base cartas militares da zona em estudo, foram só consideradas situações de cobre/descobre na zona da restinga. No limite marítimo ao largo da foz foi admitida uma fronteira aberta onde se impôs as forças de maré através das suas componentes. A montante, na Barragem de Crestuma, foi considerado um caudal efluente horário para diferentes cenários mensais médios.

A calibração do modelo foi realizada tendo por base dados caracterizadores do estuário, como os da “Campanha Hidromorfológica para Estudo da Barra do Douro” de 1994 e um modelo computacional do estuário implementado com o software RMA2 desenvolvido na Universidade do Minho.

Identificou-se que o potencial estudado caracteriza-se por uma junção das forças de maré e dos caudais efluentes da barragem de Crestuma-Lever, sendo estes preponderantes na caracterização da intensidade da corrente. Esta intensidade é mais elevada na embocadura do estuário, particularmente na zona da Cantareira onde um sistema instalado com uma área útil de 500m² seria capaz de gerar anualmente 819MWh.

Analisando o campo de velocidades de fraca magnitude no restante estuário, as restrições impostas pelo canal de navegação e a própria batimetria do estuário, será improvável a viabilização de um aproveitamento deste tipo no estuário, contudo são apresentadas algumas possibilidades. Por fim, são enumerados os possíveis impactos ambientais, socioeconómicos e paisagísticos decorrentes da instalação de um sistema de aproveitamento da energia das marés.

PALAVRAS-CHAVE: Modelação Hidrodinâmica, MOHID, Energia das Marés, Estuário do Rio Douro.

ABSTRACT

The analysis of new renewable energy solutions is currently a target of great relevance in the path of sustainability. This work involved the analysis of the potential energy of the tides in the estuary of the Douro River through the construction and application of a hydrodynamic model for the study area.

It also undertook an analysis of the state of the art in equipment and technologies available for energy generation through tidal currents.

The computational modeling of the estuary was performed using the software MOHID, based on a compilation of bathymetry data from the middle and lower estuary given by APDL, the rest being on the area between the Freixo bridge and Crestuma-Lever dam was considering linear and the existence of a navigation channel. The estuary has been defined based on military maps of the area under study were only considered situations of copper/uncovered in the area of the sandbank. In the maritime boundary of the river mouth was granted an open boundary which was imposed by the tidal forces of its components. The volume flow at Crestuma dam was considered an effluent time flow for different scenarios on monthly average.

The model calibration was performed based on data that characterizes the estuary, such as the “Campaign for Hydromorphological Study of Barra do Douro” 1994 and a computational model of estuary RMA2 implemented with software developed at the University of Minho.

The potential studied was identified and characterized by a junction of tidal forces and emerging the discharges by Crestuma-Lever dam, which are prevalent in the characterization of the current flow. The energy force is higher at the mouth of the river, in the area of Cantareira, a system could be installed there with an area of 500m², it would be able to generate annually 819MWh.

Analyzing the velocity field of low magnitude in the rest of the estuary, the restrictions imposed by the shipping channel and the bathymetry of the estuary, is unlikely to be a viable use of this type of harnessing in the estuary, though some possibilities are presented. Finally, are mentions the possible environmental impacts as well as socioeconomic and landscape arising from the installation of a system of harnessing tidal power.

KEYWORDS: Hydrodynamic Modelling, MOHID, Tide Energy, Douro River Estuary

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	i
RESUMO	iii
ABSTRACT	v
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. ENQUADRAMENTO DO TEMA.....	1
1.2. ORGANIZAÇÃO	2
2. A ENERGIA DAS MARÉS	5
2.1. O CONCEITO DE MARÉ.....	5
2.2. UTILIZAÇÃO DA ENERGIA DAS MARÉS.....	7
2.2.1. BREVE NOTA HISTÓRICA	7
2.2.2. ENERGIA POTENCIAL.....	8
2.2.3. ENERGIA CINÉTICA	11
3. TIPOLOGIAS DE EQUIPAMENTO DE GERAÇÃO ATRAVÉS DA ENERGIA CINÉTICA	15
3.1. INTRODUÇÃO	15
3.2. OPEN HYDRO	16
3.3. MARINE CURRENT TURBINES LTD.....	17
3.4. HAMMERFEST STRØM	17
3.5. CLEAN CURRENT	18
3.6. LUNAR ENERGY	18
3.7. VOITH HYDRO	19
3.8. SMD HYDROVISION	20
3.9. VERDANT POWER	20
3.10. TIDAL ENERGY LTD.	21
3.11. OCEAN FLOW ENERGY LTD.....	21
3.12. ATLANTIS RESOURCES CORPORATION LTD.....	22
3.12.1. AK SERIES	22
3.12.2. AS SERIES	22
3.12.3. AN SERIES	23
3.13. HYDRA TIDAL ENERGY TECHNOLOGY AS	23

3.14. SWANTURBINES	24
3.15. UEK CORPORATION	24
3.16. SABELLA	25
3.17. NEPTUNE RENEWABLE ENERGY	25
3.18. LUCID ENERGY TECHNOLOGIES	26
3.19. OCEAN RENEWABLE POWER COMPANY - ORPC	27
3.20. BLUE ENERGY	27
3.21. PONTI DI ARCHIMEDE INTERNATIONAL SPA	28
3.22. TIDAL ENERGY PTY LTD	29
3.23. BIOPOWER SYSTEMS PTY LTD	29
3.24. PULSE TIDAL	30
3.25. ROBERT GORDON UNIVERSITY	30
3.26. THE ENGINEERING BUSINESS LTD	31
3.27. VORTEX HYDRO ENERGY	31
3.28. C-ENERGY	32
3.29. MINESTO	32
3.30. ENERGY SYSTEMS RESEARCH UNIT - UNIVERSITY OF STRATHCLYDE	33
3.31. TIDAL STREAM	34
3.32. HYDRO GREEN ENERGY	34
3.33. FRI-EL SEA POWER	35
3.34. CURRENT POWER AB	35
3.35. NEW ENERGY CORPORATION INC.	36
3.36. HIDROGINÉTICA ENGENHARIA LTDA	36
3.37. PEEHR	37
3.38. OUTRAS ORGANIZAÇÕES	37
3.39. QUADRO RESUMO	38
4. SOFTWARE MOHID	41
4.1. NOTA INTRODUTÓRIA	41
4.2. DESCRIÇÃO GERAL DO SOFTWARE	41
4.3. MOHID WATER	42
4.3.1. MÓDULO HIDRODINÂMICO	42
4.3.2 MÓDULO DAS PROPRIEDADES DA ÁGUA	43
4.3.3 MÓDULO LAGRANGEANO	44

4.3.4 MÓDULO DE TURBULÊNCIA	44
4.4. FERRAMENTAS E CONSIDERAÇÕES AUXILIARES	44
4.4.1 MALHA COMPUTACIONAL	44
4.4.2 CONDIÇÕES DE FRONTEIRA	45
4.4.3 INTERFACE GRÁFICO	46
5. CASO DE ESTUDO: O ESTUÁRIO DO RIO DOURO	49
5.1. ESTUÁRIO DO DOURO	49
5.1.1. CARACTERIZAÇÃO GERAL DO ESTUÁRIO DO DOURO	49
5.1.2. MARÉ	50
5.1.3. AGITAÇÃO MARÍTIMA	51
5.2 CONSTRUÇÃO DO MODELO	52
5.2.1. BATIMETRIA	53
5.2.2. GRELHA	53
5.2.3. BATIMETRIA MODELADA	53
5.2.4. FORÇAS DE MARÉ	53
5.2.5. ATRITO DE FUNDO E COEFICIENTE DE DIFUSÃO TURBULENTO	54
5.2.6. DOMÍNIO E PASSO TEMPORAL	54
5.2.7. CAUDAL	54
5.2.8. CENÁRIOS DE CÁLCULO	55
5.3. CALIBRAÇÃO DO MODELO	56
5.3.1 CAMPANHA HIDROMORFOLÓGICA PARA ESTUDO DA BARRA DO DOURO	56
5.3.2 MODELO BIDIMENSIONAL DO ESTUÁRIO, RMA2	60
5.3.3 CAIS DOS BANHOS, SNIRH	62
5.3.4 JACTO DE SAÍDA DO ESTUÁRIO	62
5.4. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	63
5.4.1 EMBOCADURA (CANTAREIRA)	64
5.4.2 SECÇÃO DA PONTE D. LUIZ I	66
5.4.3 SECÇÃO DA PONTE DO INFANTE	67
5.4.4 ZONA DA ALFANDEGA DO PORTO	68
5.4.5 ZONA DA PONTE DA ARRÁBIDA	69
5.4.6 SOLUÇÕES TÉCNICAS	71
5.4.7 IMPACTES	73
5.4.8 ANÁLISE SWOT	74

6. CONCLUSÕES..... 75

6.1. CASO DE ESTUDO..... 75

6.2. EQUIPAMENTOS E TECNOLOGIAS ABORDADAS 76

6.3. OPORTUNIDADES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS..... 76

BIBLIOGRAFIA 77

ANEXOS

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig.2.1 – Relação das marés com as fases da Lua, e com as posições relativas da Terra, da Lua e do Sol, [10]	5
Fig.2.2 – Influência da declinação da Lua na maré, [11]	6
Fig.2.3 – À esquerda: Assembleia Municipal de Aveiro [15]; À direita: Moinho da Torre, Estuário do Tejo [16].....	7
Fig.2.4 – Vista aérea da Central de energia das marés de La Rance, [18].....	8
Fig.2.5 - À esquerda: Perfil Longitudinal da Central no lago Sihwa; À direita: Ensecadeira para a construção da Central (2006), [19].	9
Fig.2.6 - Representação esquemática das ligações entre ilhas para a construção da Central de Incheon, Coreia do Sul, [20].....	9
Fig.2.7 – Várias localizações equacionadas para a construção do aproveitamento no estuário do Severn, [23]	10
Fig.2.8 – Aproveitamento da Energia das Marés em Annapolis Royal. [25]	10
Fig.2.9 – Representação conceptual da Ilha da Energia, com o aproveitamento da energia das marés, [28].	11
Fig.2.10 – Potencia por m ² em função da velocidade da corrente, [31]	13
Fig.3.1 – Estado geral da tecnologia de aproveitamento da energia hidrodinâmica dos fluxos de corrente, [32]	16
Fig.3.2 – À esquerda: Protótipo com uma potência de 250kW instalado no EMEC, [34]; À direita: Sistema comercial da Open Hydro, Canadá, [35].....	16
Fig.3.3 – À esquerda: Protótipo SeaFlow; À direita: Modelo Comercial SeaGen, [37-38]	17
Fig.3.4 – À esquerda: protótipo HS300; À direita: Representação do modelo HS1000, [39]	18
Fig.3.5 – À esquerda: Turbina Clean Current; À direita: ilha do farol de Race Rocks, [40-41].	18
Fig.3.6 – À esquerda: Representação da RTT; À direita: Sistema de manutenção, facilitado pela estrutura modelar da RTT, [42].	19
Fig.3.7 – À esquerda: Sistema inicialmente desenvolvido pela Voith Hydro; À direita: Representação do sistema composto por 3 turbinas previsto para implementação em 2018, [43].....	19
Fig.3.8 – À esquerda: Representação do sistema TidEL; À direita: Protótipo do TidEL, [45]	20
Fig.3.9 – À esquerda: Representação do sistema TidEL, [47]; À direita: Turbinas Verdant Power em terra, [48]	20
Fig.3.10 – Representação do sistema DeltaStrem, [49]	21
Fig.3.11 – À esquerda: Representação do sistema Evopod; À direita: Protótipo do Evopod à escala 1/10, [51].....	21
Fig.3.12 – À esquerda: Representação do Sistema AK Series; À direita: Fotografia do equipamento AK-100 antes da sua instalação no EMEC, [52].....	22
Fig.3.13 – Instalação do sistema AS-400, Singapura, [52].....	22

Fig.3.14 – Sistema NA-400, instalado na Austrália, [52].....	23
Fig.3.15 – Representação dos sistemas propostos pela Hydra Tidal, [54-55].....	23
Fig.3.16 – Representação dos sistema Swanturbines e do seu processo de instalação, [57]	24
Fig.3.17 – Fotografias do sistema UEK, “Dual Hydroturbine Unit”, [58].....	24
Fig.3.18 – À esquerda: Protótipo Sabella D03; À direita: Representação do Sabella D10, [59].	25
Fig.3.19 – À esquerda: Construção da Estrutura flutuadora, [61]; À direita: Representação de um corte da estrutura onde se pode observar a turbina de eixo vertical no seu interior	25
Fig.3.20 – À esquerda: Representação da Gorlov Helical Turbine, [62]; No centro: Instalação de teste em Vinalhaven Island, EUA, 2003; À direita: Aplicação da turbina helicoidal na ilha de Combu, Brasil, 2002, [65]	26
Fig.3.21 – À esquerda, estação de produção de energia através das correntes de maré, à direita representação geral do projecto, Uldomok, Coreia do Sul, [66].....	27
Fig.3.22 – Representação do sistema TidGen™ Power System, [67].....	27
Fig.3.23 – À esquerda: Representação do sistema flutuador ancorado por cabos ao fundo marinho; À direita: Sistema de varias turbinas acopladas, formando uma barreira submersa, [68]	28
Fig.3.24 – À esquerda: Representação do sistema Kobold, [70]; À direita: Fotografia do sistema em funcionamento, Itália.....	28
Fig.3.25 – À esquerda: Modelo de testes emerso, Austrália; À direita: Representação do sistema “Davidson-Hill Venturi Turbine” em funcionamento, [71]	29
Fig.3.26 – Sistema bioSTREAM™, na imagem à direita é possível perceber sua dimensão devido a uma comparação com uma pessoa no apoio da estrutura, [72].	29
Fig.3.27 – À esquerda e no centro: Sistema PS100, [74]; À direita: Representação do sistema comercial com 1MW de potência	30
Fig.3.28 – Fotografias do sistema Sea Snail em terra, [75].	30
Fig.3.29 – Fotografia (à esquerda) e representação (à direita) do sistema Stringray, [78].	31
Fig.3.30 – À esquerda: Fotografia de um ensaio laboratorial de quadro cilindros que oscilam na vertical sujeitos a uma corrente horizontal, EUA; À direita: Esquema do funcionamento do sistema VIVACE, [79].....	32
Fig.3.31 – À esquerda e no centro: Sistema de demonstração da tecnologia instalado no delta do rio Westerschelde, Holanda; À direita: Representação do sistema comercial, [82].....	32
Fig.3.32 – À esquerda: Representação do sistema Deep Green; À direita: Fotografia dos testes realizados com um protótipo deste sistema no laboratório do “Maritime Research Institute Netherlands”, [83].	33
Fig.3.33 – À esquerda: Representação do sistema CoRMaT; No centro: Modelo à escala 1/10 para teste do rotor; À direita: Modelo à escala 1/10 de análise do comportamento geral do sistema, [84] .	33
Fig.2.34 – À esquerda: Representação do sistema Tricon; À direita: Testes realizados no Ifremer, [85].	34

Fig.3.35 – À esquerda: Sistema instalado numa estrutura flutuante; À direita: Representação do sistema composto por vários módulos acoplados, [86].	34
Fig.3.36 – À esquerda: Representação do sistema composto por dois tubos; À direita: Sistema ligado a um navio composto por quatro tubos com três turbinas cada, [87].	35
Fig.3.37 – Representação do sistema proposto pela Current Power AB, [88].	35
Fig.3.38 – À esquerda: Representação do sistema EnCurrent; À direita: EnCurrent de 5kW de potência, [89].	37
Fig.3.39 – À esquerda: Fotografia do sistema emerso; À direita: representação da estrutura flutuadora, [90].	37
Fig.3.40 – À esquerda: testes com o protótipo, Peniche; À direita: representação do sistema Hidroreactor, [91].	38
Fig. 4.1 - Concepção hierárquica de interação do sistema MOHID, [92].	42
Fig. 4.2 – Malha ilustrativa das propriedades de discretização vertical do sistema Mohid, [93].	45
Fig. 4.3 – Vista da janela principal o MOHID GIS, [96].	46
Fig. 4.3 – Janela OpenGL editada no pós-processador, [96].	47
Fig.5.1 – Localização e representação do Estuário do Douro, [98].	49
Fig.5.2 – Descargas mensais médias diárias no estuário do Douro referentes aos períodos de 1933-1984 e 1985 e 1994, [98].	50
Fig.5.3 – Frequência da direcção das ondas registadas na bóia de Leixões (EUrosion, 2006).	51
Fig.5.4 – Estrutura utilizada para a construção do modelo, a cinzento encontram-se identificados os softwares utilizados.	52
Fig.5.5 – Representação da batimetria modelada	53
Fig.5.6 – Descargas mensais médias diárias no estuário do rio Douro entre 1986-2009 e valor de mensal do caudal diário médio admitido para cenários de cálculo.	55
Fig.5.7 – Caudal horário turbinado adoptado para diferentes períodos do ano.	55
Fig.5.8 – Nível da superfície livre da água referente ao ZH, observado/modelado em Leixões, dias 19 e 20 de Setembro de 1994.	56
Fig.5.9 – Nível da superfície livre, observado/modelado no Marégrafo Cantareira, dias 19, 20 e 21 de Setembro de 1994.	57
Fig.5.10 – Nível da superfície livre, observado/modelado Cais da Estiva, dias 19, 20 e 21 de Setembro de 1994.	57
Fig.5.11 – Estações de observação A1 e B1 (adaptado), [106].	57
Fig.5.12 – Velocidades da corrente observada no fundo e superfície / modelada na estação A1, 19/09/94.	58
Fig.5.13 – Velocidades da corrente observada no fundo e superfície / modelada na estação B1, 21/09/94.	58
Fig.5.14 – Velocidades da corrente observada no fundo e superfície / modelada na estação A1, 27/09/94.	59

Fig.5.15 – Velocidades da corrente observada no fundo e superfície / modelada na estação B1, 29/09/94	59
Fig.5.16 – Velocidades da corrente observada no fundo e superfície / modelada na estação B1, 1/10/94	59
Fig.5.17 – Velocidades da corrente observada no fundo e superfície / modelada na estação B1, 3/10/94	59
Fig.5.18 – Representação da intensidade da corrente no estuário no modelo RMA2 e no MOHID às 8.00h do dia 31 de Janeiro 2010 com um caudal descarregado constante em Crestuma de 500m ³ /s.60	
Fig.5.19 – Comparação dos valores modelados da velocidade da corrente e nível da superfície livre no software MOHID e RMA2 para quatro pontos do estuário, dias 30 e 31 de Janeiro 2010	61
Fig.5.20 – Nível da superfície livre, observado/modelado no Cais dos banhos, dias 29, 30 e 31 de Janeiro, 2010.	62
Fig.5.21 – Representação do jacto de saída modelado em duas situações temporais.	62
Fig.5.22 – Representação das velocidades de escoamento durante um pico de vazante da maré viva..	63
Fig.5.23 – Representação dos níveis de maré simulados durante um período de 29.5 dias.	63
Fig.5.24 – Representação da zona em análise, a cor azul está identificado o canal de navegação e a cor vermelha a zona de possível instalação de equipamentos de geração de energia.	64
Fig.5.25 – Velocidade da corrente na zona em estudo para um caudal de 1200m ³ /s durante um ciclo lunar.	64
Fig.5.26 – Velocidade da corrente na zona em estudo para os diferentes cenários de cálculo	64
Fig.5.27 – Potência disponível por metro quadrado na zona em estudo para os vários cenários de cálculo.....	65
Fig.5.28 – Energia anual Disponível e Recuperável por metro quadrado, referente à zona em estudo... ..	65
Fig.5.29 – Velocidade da corrente na secção em estudo para os diferentes cenários de cálculo	66
Fig.5.30 – Potência disponível por metro quadrado na secção em estudo para os vários cenários de cálculo.....	66
Fig.5.31 – Energia anual Disponível e Recuperável por metro quadrado, referente à secção em estudo.	66
Fig.5.32 – Velocidade da corrente na secção em estudo para os diferentes cenários de cálculo.	67
Fig.5.33 – Potência disponível por metro quadrado na secção em estudo para os vários cenários de cálculo.....	67
Fig.5.34 – Energia anual Disponível e Recuperável por metro quadrado, referente à secção em estudo.	67
Fig.5.35 – Velocidade da corrente na zona em estudo para os diferentes cenários de cálculo.....	68
Fig.5.36 – Potência disponível por metro quadrado na zona em estudo para os vários cenários de cálculo.....	68

Fig.5.37 – Energia anual Disponível e Recuperável por metro quadrado, referente à zona em estudo.....	68
Fig.5.38 – Velocidade da corrente na zona em estudo para os diferentes cenários de cálculo	69
Fig.5.39 – Potência disponível por metro quadrado na zona em estudo para os vários cenários de cálculo	69
Fig.5.40 – Energia anual Disponível e Recuperável por metro quadrado, referente à secção em estudo.....	69
Fig.5.41 – Energia anual recuperável por metro quadrado nas zonas em estudo	70
Fig.5.42 – Evolução da restinga do Cabedelo, a imagem de fundo refere-se a 2007, o limite a cor verde apresenta a morfologia em 2004 e o limite de cor vermelha a de 2003, (adaptado do Google Earth).....	71
Fig.5.43 – À esquerda: Representação de um campo de aproveitamento da energia das marés, [46]; À direita: Fotomontagem de um aproveitamento flutuante instando na zona da Cantareira	72
Fig.5.44 – Análise SWOT relativa à instalação de um aproveitamento da energia das marés e caudais efluentes de Crestuma no estuário do rio Douro	74

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2.1 – Comparação de tecnologias de produção de energia baseados no mercado do Reino Unido, [62]	12
Quadro 3.1 – Resumo das características dos Equipamentos analisados	38
Quadro 5.1 – Elementos relativos às marés em Leixões (IHRH, 1999)	51
Quadro 5.2 – Simulações realizadas durante um ciclo lunar de 29.5 dias e tempo por ano correspondente.....	56
Quadro 5.3 – Energia anual produzida por um sistema padrão com 100m de comprimento por 5m de altura.....	70

SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

€ – euro
A – área da secção de fluxo
 A_H e A_V – viscosidade cinemática turbulenta na horizontal e vertical
 C_p – coeficiente de eficiência
 f – parâmetro de Coriolis
 g – aceleração da gravidade
GWh – gigawatt hora
km – quilómetro
kWh – quilowatt hora
kW – quilowatt
m – metro
MW – megawatt
MWh – megawatt hora
P – Potência em W
 p – pressão
s – segundo
 t – representa o tempo
tep – tonelada equivalente de petróleo
TWh – terawatt hora
 u, v, w – componentes da velocidade
 η – eficiência da transformação da energia mecânica em eléctrica
 ρ – massa volúmica da água

APDL – Administração do Porto do Douro e Leixões
AWATEA – Aotearoa Wave and Tidal Energy Association
CERPCH – Centro Nacional de Referencia em Pequenas Centrais Hidroelectricas
CNES – Centre National d'Études Spatiales
CORE Project – Cornwall Ontario River Energy Project
CoRMaT – Contra-Rotating Marine Turbine
CQNUAC – Convenção Quadro das Nações Unidas sobre Alterações Climáticas
DECC – Department of Energy and Climate Change
EMEC – European Marine Energy Center
EUA – Estados Unidos da América
FC – Fluxo Cruzado
FEUP – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
HSHI – Hyundai Samho Heavy Industries
Ifremer - Institut Français de Recherche pour l'exploitation de la Mer
IST – Instituto Superior Técnico
KOMIPO – Korean Midland Power
LCOE – Levelized Cost of Electricity
Ltd – Limited
Ltda – Limitada
MARETEC – Marine and Environmental Technology Research Center
MOHID – Modelo Hidrodinâmico
NAREC – National Renewable Energy Centre
NASA - National Aeronautics and Space Administration
NMM – Nível Médio do Mar
OES – Ocean Energy Systems
OREC – Ocean Renewable Energy Coalition
ORPC – Ocean Renewable Power Company
PEEHR – Produtora de Energia Eléctrica Por Hidro-Reação
Prof. – Profundidade
RITE – Roosevelt Island Tidal Energy
RTT – Rotech Tidal Turbine
SNIRH – Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos
SMS – Surface-Water Modeling System

TEH – Turbina de Eixo Horizontal

TEV – Turbina de Eixo Vertical

UEK – Underwater Electric Kite)

UNIDO – United Nations Industrial Development Organization

ZH – Zero Hidrográfico

1

INTRODUÇÃO

1.1. ENQUADRAMENTO DO TEMA

Esta dissertação, no âmbito do Mestrado Integrado em Engenharia Civil, ramo Hidráulica, Recursos Hídricos e Ambiente, referente ao ano lectivo 2009/2010, tem como título “Avaliação do Potencial Energético das Marés no Estuário do Rio Douro” e foi desenvolvida durante um semestre.

O interesse no desenvolvimento e produção de energias renováveis tem-se acentuado nos últimos anos, na procura de uma solução sustentável face ao aumento do consumo de energia e à dependência dos combustíveis fósseis.

O mercado energético segue uma mudança de paradigma acentuada nos últimos anos, desencadeada com a crise petrolífera dos anos 70 e posteriormente com a mediatização do fenómeno das alterações climáticas com origens antropogénicas. Neste sentido vários países acordaram metas para o controlo e redução das emissões dos gases com efeito de estufa, orientado as suas políticas energéticas na procura e implementação de soluções menos poluidoras e capazes de sustentar uma independência energética.

Em 1992 a Convenção Quadro das Nações Unidas sobre Alterações Climáticas (CQNUAC) deu os primeiros passos para a assinatura do Protocolo de Quioto em 1997, onde foram estabelecidas metas concretas para a redução das emissões, tendo sido posteriormente revistas no sentido de alcançar de forma mais célere os objectivos à escala mundial.

Desta forma o sector das energias renováveis desenvolveu-se acentuadamente e Portugal distinguiu-se especialmente neste movimento, aproveitando o seu potencial em recursos renováveis. A Estratégia Nacional para a Energia de 2005, [1], refere que a política energética se tem alterado nas suas diversas vertentes, sendo um factor importante do crescimento sustentado da economia portuguesa e da sua competitividade, pela capacidade em criar condições concorrenciais favoráveis ao desenvolvimento de empresas modernas, eficientes e bem dimensionadas, pelo seu efeito potencial na redução do preço dos factores de produção e, também, pela sua capacidade em gerar novo investimento em áreas com uma elevada componente tecnológica.

Paralelamente, a política energética deve articular-se de modo estreito com a política ambiental, integrando a estratégia de desenvolvimento sustentável do País. Neste sentido pode-se destacar: o aumento da utilização do potencial hídrico, com a construção de novas barragens, mini-hidráulicas e reforços de potência; a aposta na energia fotovoltaica com a construção do quinto maior parque a nível mundial, [2]; a construção de novas centrais geotérmicas nos Açores; a criação de grandes parques eólicos, sendo actualmente o nono país em termos de capacidade instalada, [3]; e a instalação em 2008 do primeiro parque mundial de produção de energia através das ondas, que embora de capacidade

reduzida e actualmente suspenso contribuiu para a mediatização e reposicionamento da imagem de Portugal em todo o mundo.

Em 2008 foi criado o Plano Nacional de Acção para a Eficiência Energética 2015, [4], como um plano de acção agregador de um conjunto de programas e medidas de eficiência energética, num horizonte temporal que se estende até ao ano de 2015. Neste âmbito foram criados importantes incentivos para a micro-produção de energia eléctrica, viabilizando projectos de pequena dimensão e impulsionando o estudo de novas soluções até então consideradas não competitivas.

Actualmente a Estratégia Nacional para a Energia 2020, [5], aprovada em 2010 pretende em primeiro lugar manter o país na fronteira tecnológica das energias alternativas, potenciando a produção e exportação de soluções com elevado valor acrescentado que permitam diminuir a dependência energética do exterior e reduzir as emissões de gases com efeito de estufa. Em segundo lugar pretende também incentivar que Portugal seja reconhecido como um país líder nas energias renováveis no contexto internacional pelo apoio à investigação e desenvolvimento de tecnologias, execução de projectos de demonstração e consolidação de clusters industriais.

Neste sentido é facilitada a via para o estudo e criação de novos projectos de geração de energia eléctrica, como o aproveitamento da energia das marés em estuários e rias. O desenvolvimento do aproveitamento da energia cinética das marés para a produção de electricidade tem-se acentuado ultimamente com a consolidação e eficiência das tecnologias capazes do seu aproveitamento, dando os primeiros passos na implementação de projectos com carácter comercial.

A avaliação do potencial energético de um recurso como a energia das correntes de maré torna-se assim relevante, tendo sido já efectuados na costa portuguesa alguns estudos de avaliação deste potencial para o Estuário do Tejo, [6], Estuário do rio Lima, [7], Barra do Porto de Aveiro, [8] e Ria Formosa, [9].

O estuário do rio Douro onde desemboca um dos rios mais importantes e caudalosos da península ibérica apresenta-se como uma boa oportunidade de estudo e avaliação deste seu potencial.

1.2. ORGANIZAÇÃO

O trabalho encontra-se organizado em seis capítulos, correspondendo a presente introdução ao Capítulo 1. Após o capítulo introdutório, é realizada uma breve referência à teoria das marés e à evolução da utilização da sua energia. Neste Capítulo 2 são ainda apresentados em detalhe os casos de aproveitamento da energia potencial das marés e caracterizado genericamente o estado actual dos sistemas de aproveitamento da energia dos fluxos de maré.

No Capítulo 3, segue-se uma caracterização dos diversos sistemas de geração através da energia cinética das marés desenvolvidos actualmente.

O Capítulo 4 contempla a descrição geral do funcionamento do *software* MOHID e das suas ferramentas auxiliares utilizadas na modelação do estuário do rio Douro.

O caso de estudo referente ao estuário do rio Douro é apresentado no Capítulo 5. É feita uma caracterização do estuário e da estrutura do processo de modelação e calibração, assim como a apresentação dos resultados obtidos. Nos locais identificados com maior potencial energético é realizada uma análise mais pormenorizada, identificando a energia passível de ser produzida e

algumas considerações relativas a soluções técnicas e impactes causados pela possível instalação de sistemas de aproveitamento da energia das marés.

No Capítulo 6 são apresentadas algumas considerações finais e conclusões relativas ao caso de estudo e aos equipamentos e tecnologias caracterizadas neste trabalho. Por fim, são apresentadas algumas oportunidades e possíveis desenvolvimentos futuros.

2

A ENERGIA DAS MARÉS

2.1. O CONCEITO DE MARÉ

A maré é um fenómeno que se manifesta em todos os oceanos através de movimentos verticais periódicos de subida e descida do nível da água, acompanhada por movimentos horizontais variáveis, designados por correntes de maré.

Designa-se por maré astronómica ou simplesmente maré, o fenómeno ligado às alterações provocadas pela variação da força de atracção de todos os astros em particular do Sol e da Lua sobre a água, Figura 2.1. As alterações provocadas pelo vento e pela variação da pressão são usual e impropriamente chamadas de maré meteorológica, pois são fenómenos de ocorrência casual, contrastando com o conceito periódico de maré. As correntes de maré são estudadas em conjunto com as restantes correntes marítimas e dependem da morfologia dos locais.

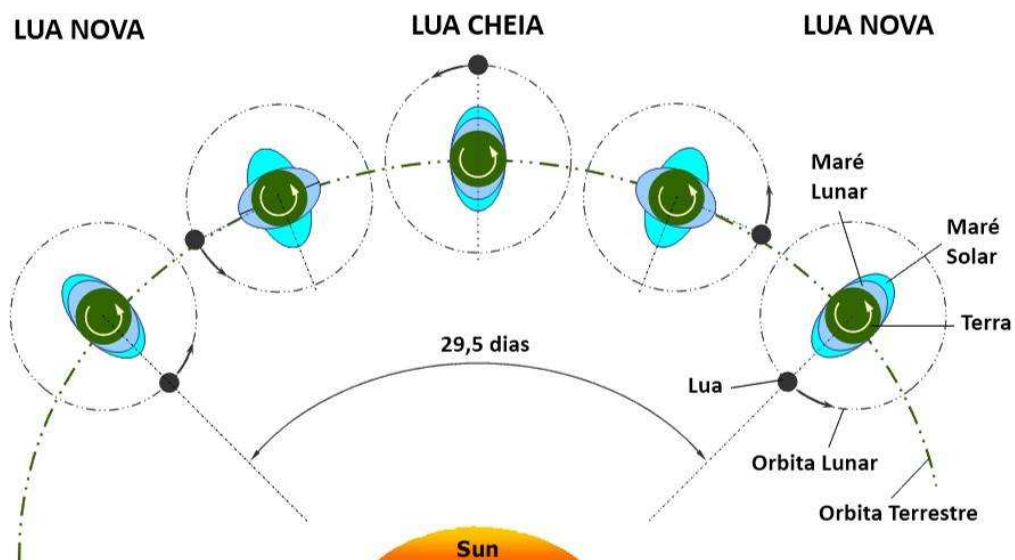


Fig.2.1 – Relação das marés com as fases da Lua, e com as posições relativas da Terra, da Lua e do Sol, [10].

O sistema de marés terrestre é definido essencialmente pela interacção gravitacional do movimento da Lua em torno da Terra, conjugado com o movimento destas em torno do Sol. Este movimento é caracterizado por um período de 18 anos e 11 dias a que se chamam “saros”, em que o Sol e a Lua voltam a ocupar a mesma posição relativa.

Devido ao facto de a Lua estar muito mais próxima da Terra que o Sol, a força geradora das marés por parte do Sol é 46% da força da Lua. Quando os dois astros, Sol e Lua, estão em conjunção ou oposição, isto é, em sizízia, as acções das forças somam-se e resultam as marés vivas. Por outro lado, quando estes astros estão em quadratura, as acções são perpendiculares diminuindo o seu efeito, originando marés mortas. A ocorrência das marés vivas é ampliada à passagem do Sol no plano do Equador, correspondente a uma maior aproximação, desta forma, as marés vivas equinociais são particularmente fortes ocorrendo duas vezes no ano durante os meses de Setembro e Março.

Este fenómeno embora regido por leis completamente estabelecidas, varia com as condições locais da batimetria, alterando a propagação da onda de forma tão complexa que a dedução teórica das suas características exactas apresenta alguma dificuldade. Desta forma, o conhecimento do fenómeno local é conseguido através da instalação de marégrafos, onde se fazem observações contínuas durante um período mínimo de 19 anos, equivalente à duração do ciclo de marés. Desta forma é possível estabelecer correlações para pontos relativamente próximos.

A amplitude das marés é influenciada pela morfologia do litoral podendo classificar-se em micromareal (amplitudes inferiores a 2m), mesomareal (entre 2 e 4m) e macromareal (superior a 4m).

A latitude do local caracteriza o tipo de marés. Nas marés diurnas, existe apenas uma preia-mar e uma baixa-mar num dia lunar (período de 12,42h). Nas marés semi-diurnas ocorrem duas preia-mares e duas baixa-mares num dia lunar, podendo existir diferenças entre as alturas das baixa-mares (ou preia-mares) do mesmo dia, designando-se assim a preia-mar e baixa-mar de superior e inferior, respectivamente, Figura 2.2, [11].

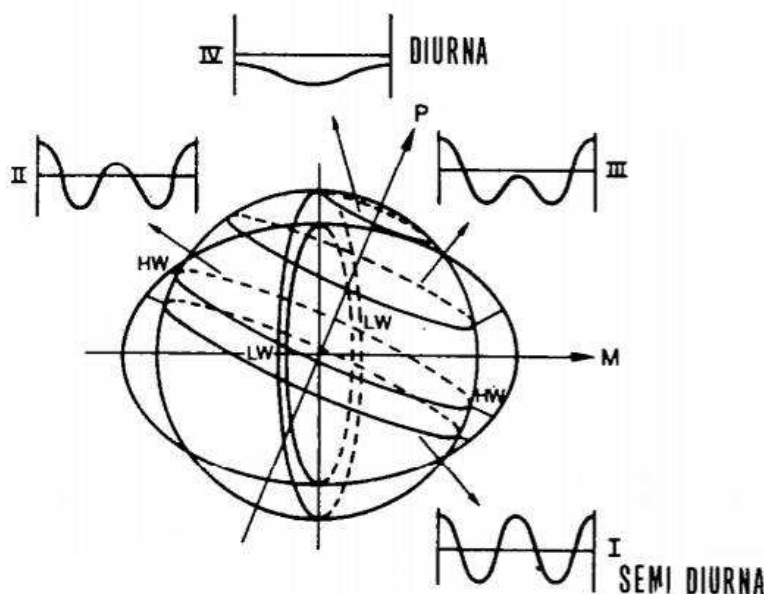


Fig.2.2 – Influência da declinação da Lua na maré, [11].

O fenómeno de maré está presente nos deltas e estuários, e o seu estudo apresenta uma maior complexidade variando naturalmente conforme o local, a morfologia, a corrente do rio e a ondulação incidente. O seu estudo apresenta grande importância para o estabelecimento da navegabilidade, para a análise da propagação da cunha salina, para estudos ambientais e mais recentemente para a análise do potencial energético das correntes de maré.

2.2. UTILIZAÇÃO DA ENERGIA DAS MARÉS

A energia das marés, também designada por energia maremotriz, é uma energia renovável e limpa, decorrente do fenómeno de maré. O potencial de utilização desta energia é elevado, embora actualmente ainda pouco explorado.

O World Energy Council estima que a energia dissipada anualmente em resultado das marés é de 20 000TWh, dos quais 200TWh são considerados economicamente viáveis para a produção de electricidade. O interesse no aproveitamento desta energia para a produção de electricidade é conhecido desde a década de 60, tendo sido identificados vários locais para a implementação de projectos. Contudo, na maioria dos casos, o custo foi considerado demasiado elevado para a construção do aproveitamento, [12].

O mercado da energia das marés pode ser dividido em dois campos, o da utilização da energia potencial das marés com o recurso a açudes ou barragens, ou a utilização da energia cinética das correntes de maré.

2.2.1. BREVE NOTA HISTÓRICA

Encontram-se referências do aproveitamento da energia das marés na Antiguidade Clássica, no Rio Tibre próximo da cidade de Roma e no Estuário da junção dos rios Tigre e Eufrates, [13]. Contudo é na Idade Média que esta tecnologia é vulgarizada por quase toda a Europa, através da instalação de moinhos de maré nas entradas estreitas de estuários e baías, aproveitando a diferença de nível do fluxo de maré.

Em Portugal, existiram vários moinhos de maré, que se concentravam essencialmente no Estuário do Tejo (cerca de 40) e na Ria Formosa (mais de 50), [14]. Com o advento da industrialização e de novas fontes de energia, a maioria foi deixada ao abandono, sendo que só alguns resistiram à passagem do tempo. Actualmente este património tem vindo a ser catalogado e recuperado. Um exemplo emblemático da reutilização de um moinho de maré está patente no edificio da Assembleia Municipal de Aveiro, conhecido como antiga Capitania do Porto de Aveiro, Figura 2.3.



Fig.2.3 – À esquerda: Assembleia Municipal de Aveiro [15]; À direita: Moinho da Torre, Estuário do Tejo [16].

Contudo o primeiro projecto de aproveitamento da energia das marés para a produção de energia eléctrica, surgiu em 1913, numa pequena cidade alemã no Mar do Norte, Husum. Este sistema era suficiente para iluminar a povoação referida, utilizava os tanques para o cultivo de ostras como

reservatórios ligados ao mar, através de um canal, em que o fluxo de maré movimentava as turbinas ligadas a um pequeno gerador, [17].

2.2.2. ENERGIA POTENCIAL

O aproveitamento da energia das marés através da sua energia potencial, é um método baseado no funcionamento dos moinhos de maré. Contudo a viabilidade económica de um projecto para produção de energia eléctrica, requer um elevado desnível de maré e condições naturais apropriadas, sendo tal facto restrito a poucos locais do planeta. O aproveitamento necessita de uma costa apropriada para a construção de um açude ou barragem, de forma a criar uma albufeira, sendo o funcionamento similar ao de uma central hidroeléctrica convencional, tendo, no entanto, a possibilidade de o turbinamento se realizar nas duas direcções consoante os estados de maré.

Como a maior parte das energias renováveis, este tipo de aproveitamento não é constante nem controlável, no entanto, apresenta uma grande vantagem pois é previsível, até mesmo a longo prazo.

A implantação de projectos deste tipo, para além do aproveitamento energético, pode criar uma ligação rodoviária entre as margens do estuário, garantir uma regularização controlada das marés e atenuar fenómenos de intrusão salina.

Os impactes ambientais estão maioritariamente ligados à implantação da barragem em zonas com ecossistemas complexos. Todavia, estes impactes são muito menores do que num aproveitamento hidroeléctrico convencional, devido às zonas inundadas serem já atingidas pelo fenómeno das marés e o desnível de montante para jusante ser reduzido.

O paradigma da aplicação desta tecnologia é a Central de energia das marés de La Rance, França, terminada em 1966, com 24 turbinas bolbo, cada uma capaz de produzir 10MW. A barragem tem 750m de comprimento e 13m de altura. Foram necessários 25 anos de estudos e 6 anos de construção até esta central estar pronta, Figura 2.4.

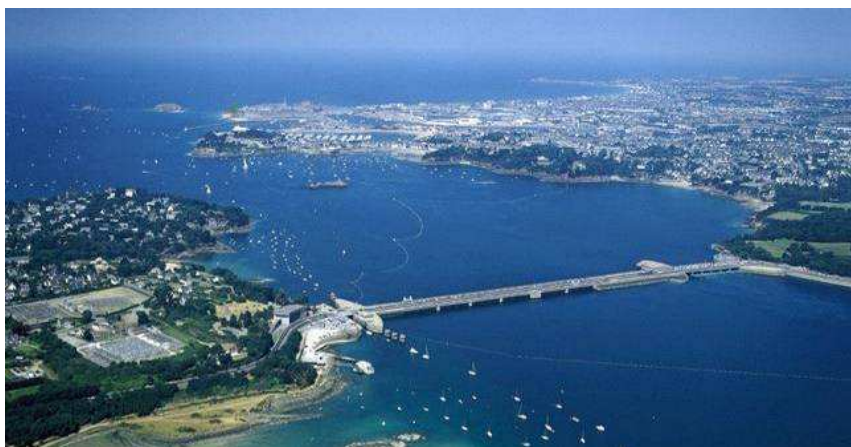


Fig.2.4 – Vista aérea da Central de energia das marés de La Rance, [18].

A Coreia do Sul tem sido um dos países mais interessados em investir neste tipo de tecnologia, desenvolvendo vários estudos desde 1930. Diversos projectos encontram-se em análise, estando já na fase final de construção, o primeiro deste tipo na Coreia do Sul e o maior desde a construção da Central de energia das marés de La Rance, com um custo total de aproximadamente 260 milhões de Euros. Este projecto no Lago Shiwa, na baía de Kyunggi, tem como base a reutilização de um antigo açude de regularização de marés com 10 km de extensão. A potencia instalada é de 254MW (25,4MW

× 10 unidades tipo Bolbo com diâmetro de rotor de 7,5 m para 64,29rpm), sendo operado numa única direcção, a partir do mar para o lago, permitindo que até 147 040 000 m³ sejam utilizados numa onda de maré, [19], Figura 2.5.

Neste mesmo país deverá iniciar-se em 2017 a construção de uma mega Central localizada em Incheon, que ligará 3 ilhas e terá a capacidade de 1320MW. Está também em fase de estudo final a construção de uma central na baía de Garorim com a capacidade de 440MW, Figura 2.6.



Fig.2.5 - À esquerda: Perfil Longitudinal da Central no lago Sihwa; À direita: Ensecadeira para a construção da Central (2006), [19].



Fig.2.6 - Representação esquemática das ligações entre ilhas para a construção da Central de Incheon, Coreia do Sul, [20].

Na década de oitenta, o actual *Department of Energy and Climate Change* (DECC), do Reino Unido, estudou para a sua costa, a capacidade de produção energética através desta tecnologia. Vários estuários foram identificados, surgindo inúmeros projectos, desde o Rio Dovey com uma produção anual de 50GWh,[21], até grandes projectos como o do Estuário do Severn com uma capacidade de produção de 19,7TWh por ano, [22], Figura 2.7. Destes projectos destacam-se os do estuário do Mersey e do Severn, alvo de estudos mais detalhados com vista à sua construção, que se prevê venha a ocorrer num futuro próximo.

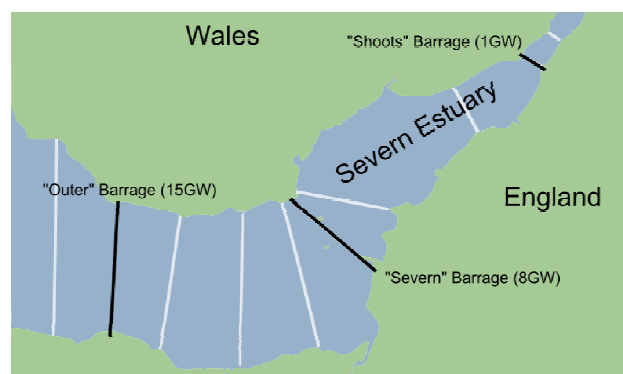


Fig.2.7 – Várias localizações equacionadas para a construção do aproveitamento no estuário do Severn, [23].

A Baía de Fundy, Canadá, é conhecida por ser um dos locais no mundo com maior amplitude de maré, podendo alcançar os 16.2m, [24]. Numa sub-bacia desta baía, existe desde 1984, em Annapolis Royal, um aproveitamento da energia das marés, com uma potência instalada de 20MW, produzindo anualmente 50GWh, Figura 2.8.



Fig.2.8 – Aproveitamento da Energia das Marés em Annapolis Royal. [25].

O fiorde de Kislaya Guba, Rússia, possui uma ligação ao Mar de Barents onde foi instalada em 1968 um projecto experimental com uma potência de 0.4kW. Este projecto visava validar a viabilidade desta tecnológica para a construção em larga escala. Contudo esteve fora de funcionamento durante 10 anos por falta de financiamento, sendo retomado em 2004, [26].

Na China foram construídos entre as décadas de 50 e 70 cerca de cinquenta aproveitamentos da energia das marés de reduzida potência, sendo a maioria de microgeração. Actualmente apenas três destes aproveitamentos se encontram operacionais, encontrando-se maior em Jiangxia, com uma capacidade instalada de 3.2MW. Recentemente foi aprovado um reforço de potência desta unidade e vários projectos têm sido equacionados para o país, [27].

Outra hipótese que está a ser encarada no âmbito do aproveitamento da energia potencial das marés, propõe a construção de lagoas artificiais no mar. A construção offshore tem como vantagem a diminuição dos impactes ambientais, a possibilidade de divisão da lagoa para uma melhor gestão e a oportunidade de funcionar como atracção turística. Neste campo destaca-se o acordo assinado pela

empresa *Tidal Electric* com o governador da província chinesa de Liaoning, para a construção de uma lagoa próxima da foz do rio Yalu, com a capacidade de 300MW, Figura 2.9.



Fig.2.9 – Representação conceptual da Ilha da Energia, com o aproveitamento da energia das marés, [28].

2.2.3. ENERGIA CINÉTICA

A energia cinética das marés está relacionada com o constante movimento dos fluxos de maré. O aproveitamento desta energia é recente e encontra-se ainda numa fase de desenvolvimento, existindo uma gama variada de soluções.

A produção de energia efectua-se através de um sistema de turbinas, instalado subaquaticamente, que se encontram ligadas a geradores eléctricos que, por sua vez, estão conectados a cabos que transportam a energia para terra, ligando o sistema à rede eléctrica.

O conceito é semelhante ao utilizado no aproveitamento da energia eólica, contudo, dada a elevada densidade da água, em relação ao ar (mais de 800 vezes superior), um sistema de turbinas aquáticas consegue produzir a mesma quantidade de energia requerendo uma menor velocidade de rotação e uma menor área. Como foi referido, o facto das previsões associadas à ocorrência das marés possuírem um grau de confiança muito superior ao das previsões associadas à quantidade de vento, eleva o seu potencial devido a uma correcta análise da viabilidade do projecto.

Embora actualmente a potência destes aproveitamentos seja reduzida, os sistemas apresentam vantagens em relação ao aproveitamento da energia potencial, podendo-se destacar:

- dispensa de obras de retenção;
- processos de instalação teoricamente simples;
- impactes visuais nulos ou reduzidos;
- possibilidade de não interferência na navegabilidade;
- reduzido impacto nos ecossistemas, pois, apesar de em geral as turbinas apresentarem elevados diâmetros, o seu movimento giratório é bastante lento.

Contudo o sistema de produção de energia através das correntes de maré, ostenta algumas adversidades, das quais se pode enumerar:

- estruturas sujeitas a elevadas forças de arrastamento;
- a implementação em locais onde as correntes são maiores, exige fortes sistemas de ancoragens;
- corrosão e desenvolvimento de colónias de organismos nas lâminas da turbina, reduzindo a sua eficiência;
- possibilidade de existência de perigo para a navegação e para a prática de actividades recreativas, [7].

A produção de energia através das correntes de marés, insere-se no grupo das energias renováveis com uma potencialidade emergente, neste sentido é relevante ter em consideração que a sua rentabilidade económica tende a aumentar com a instalação e generalização da tecnologia. Numa análise genérica, a energia produzida através das correntes de maré tem actualmente um LCOE (levelized cost of electricity – custo equiparado da electricidade) de 168 €/MWh, [29], no Anexo 1 é patente o custo equiparado da electricidade para diferentes tecnologias produtoras de energia.

No Quadro 2.1 é apresentada uma comparação que resume características relevantes de algumas tecnologias de energias renováveis.

Quadro 2.1 – Comparação de tecnologias de produção de energia baseados no mercado do Reino Unido, [30].

	Hydroeléctrica Convencional	Eólica Onshore	Eólica Offshore	Solar Fotovoltaica	Solar Térmica	Ondas	Correntes de Maré
Escalável	✓	✓	✓	x	✓	✓	✓
Pot. Média / Pot. Pico (%)	44 - 50	25 - 30	32	16	-	30	30 - 50
Não intrusiva	-	✓	-	✓	-	-	✓
Previsível	-	x	x	x	x	x	✓
Influenciada	Pluviosidade Caudais	Clima Vento Pressão	Clima Vento Pressão	Intensidade / Exposição Solar	Intensidade / Exposição Solar	Vento Barometria	Lua Gravidade Batimetria Caudais*
Custo de Instalação M€ / MW	1 – 2	1.3	3	5.4	4.1	4.8 – 7.0	2.5 – 5

*quando o equipamento se encontra instalado em estuários onde a influência dos caudais provenientes do rio é relevante.

A potência produzida por um fluxo de água pode ser calculada para uma determinada área com igual velocidade de corrente, através da equação 2.1.

$$\left(\frac{P}{A}\right)_{\text{água}} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot U^3 \quad (2.1.)$$

em que A representa a área da secção de fluxo em m^2 , P a potência em W, ρ a massa volúmica da água (neste caso salgada, sendo aproximadamente igual a 1025 kg/m^3) e U a velocidade da corrente em m/s. Devido à velocidade da água se encontrar elevada ao cubo esta é a variável mais determinante para a definição da potência energética das correntes. Segundo a equação anterior obtêm-se o gráfico apresentado na Figura 2.10.

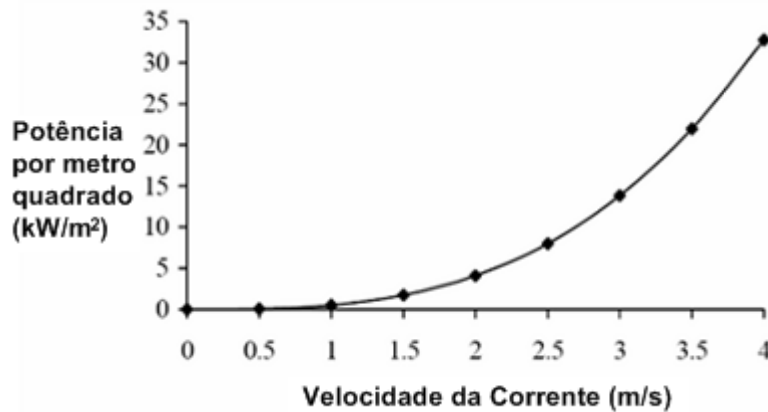


Fig.2.10 – Potencia por m² em função da velocidade da corrente, [31].

Contudo esta potência não é susceptível de ser toda transferida aos equipamentos de captação de energia dos fluxos de água e transformada em energia eléctrica, há que ter em conta a eficiência de todos os processos envolvidos naquela transferência.

Em primeiro lugar a lei de Betz indica que, no máximo só 59% da energia cinética da água poderá ser transferida a uma turbina e transformada em energia mecânica. Esta lei está relacionada com a desaceleração na água causada pelo equipamento e com o paradoxo da possibilidade teórica de se extrair toda a energia cinética da água, ou seja, a velocidade de saída do fluido seria nula, estagnando o escoamento e o próprio equipamento. Em segundo lugar é necessário ter em conta a eficiência na transformação da energia mecânica em eléctrica.

Desta forma a potência eléctrica produzida por um determinado equipamento pode ser de uma maneira geral calculada pela equação 2.2.

$$P_{elétrica} = A \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot U^3 \cdot C_p \cdot \eta \quad (2.2.)$$

$$C_p \cdot \eta = 33\% \quad (2.3.)$$

em que, C_p representa o coeficiente de eficiência do equipamento de transformação de energia cinética em mecânica, referente à lei de Betz, pode variar consoante o equipamento e velocidade de corrente entre 20 e 59%; e η indica a eficiência da transformação da energia mecânica em eléctrica, e está relacionada com a transmissão da energia do escoamento ao gerador (80-90%), a eficiência do gerador (80-95%), e a adaptação da energia gerada à rede eléctrica nacional (90-98%).

Num cálculo primário para avaliação da potencialidade de uma determinada secção de escoamento independente do equipamento utilizado, será considerado, como se observa na equação 2.3, um valor de eficiência total igual a 33%, [32].

O desenvolvimento de sistemas de aproveitamento da energia das correntes de maré tem-se acentuado recentemente, encontrando-se numa fase crucial devido à instalação dos primeiros modelos comerciais. Várias empresas e organizações efectuem pesquisas nesta área, contudo a sua divulgação é bastante restrita, de forma a defenderem os seus interesses e a sua propriedade industrial. No capítulo seguinte serão expostas algumas das soluções tecnológicas que certas empresas desenvolveram para o aproveitamento da energia hidrodinâmica das correntes.

3

TIPOLOGIAS DE EQUIPAMENTO DE GERAÇÃO ATRAVÉS DA ENERGIA CINÉTICA

3.1. INTRODUÇÃO

Actualmente existe uma variada gama de soluções para o aproveitamento da energia das correntes de maré apresentadas por quase uma centena de empresas que se especializaram neste domínio. Contudo, só alguns projectos foram implementados, dando os primeiros passos na comercialização desta energia.

Os sistemas apresentados podem ser divididos consoante as suas características de captação da energia das marés, dividindo-se em dois grandes grupos:

- **Sistemas com Turbina:**
 - de eixo horizontal: o eixo de rotação é paralelo ao fluxo de água, podendo ser instalado no interior de uma conduta para criar efeitos de fluxo secundário, concentrando-o e produzindo uma diferença de pressão que aumenta o seu rendimento;
 - de eixo vertical: este dispositivo capta a energia de forma semelhante às turbinas de eixo horizontal, porém a turbina está montada num eixo vertical, ortogonal ao fluxo de água;
 - de fluxo cruzado, o eixo de rotação do rotor é paralelo à superfície da água, mas ortogonal ao fluxo de entrada de água;
 - Venturi: a turbina encontra-se inserida numa conduta Venturi que funciona como funil, concentrando o fluxo de água que passa pela turbina;
- **Sistemas sem turbinas:**
 - Vortex que induz a vibração: este sistema capta as vibrações resultantes da formação de vórtices formados a jusante do corpo oscilatório;
 - Lâminas Oscilantes: a energia é transmitida a líquidos sob pressão através de um hidropiano que oscila consoante o fluxo de corrente. Uma variante deste sistema inclui dispositivos biomiméticos para captação de energia;
 - Outros (*Piezoelectric, Sails, Flutter Vane*), [33].

Na Figura 2.10 observa-se o estado actual da tecnologia de aproveitamento da energia hidrodinâmica dos fluxos de corrente e constata-se que a tecnologia mais utilizada é a turbina de eixo horizontal. Esta tecnologia revela também maior sucesso comercial, contudo este facto poderá estar relacionado com uma maior experiência adquirida no ramo eólico deste tipo de tecnologia, [34].

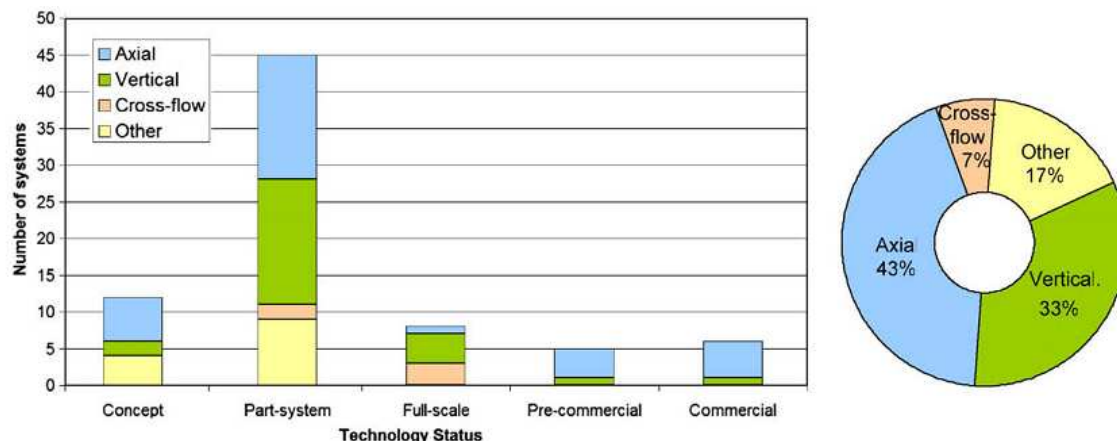


Fig.3.1 – Estado geral da tecnologia de aproveitamento da energia hidrodinâmica dos fluxos de corrente, [33].

Os modos de amarração dos sistemas podem também ser diferenciados, passando pela utilização de bases de gravidade ou do mono-pilar para locais de baixa profundidade. Para profundidades mais elevadas destaca-se a utilização de estacas ou sistemas de ancoragem ao fundo marinho da estrutura flutuadora.

De seguida são apresentados alguns dos sistemas desenvolvidos por empresas ou organizações especializadas no aproveitamento da energia das correntes hídricas.

3.2. OPEN HYDRO

Desde 2006 foram realizados com sucesso, testes no *European Marine Energy Center* (EMEC), de um protótipo reduzido com uma capacidade de 250kW. Desta forma o equipamento encontra-se, actualmente comercializado, consistindo numa turbina com 16m de diâmetro com um orifício central aberto, de forma a minimizar os impactes na vida marinha. Em 2009 a empresa irlandesa *Open Hydro*, instalou com sucesso este seu modelo comercial com 1MW de potência, na Baía de Fundy, Canadá, [35].



Fig.3.2 – À esquerda: Protótipo com uma potência de 250kW instalado no EMEC, [35]; À direita: Sistema comercial da *Open Hyro*, Canadá, [36].

3.3. MARINE CURRENT TURBINES LTD

A *Marine Current Turbines Ltd*, é pioneira no desenvolvimento deste tipo de tecnologia, com a construção de um modelo de 15kW em 1994, na costa oeste da Escócia. De 2003 a 2009 testou, no estuário do rio Severn, uma turbina de maré, *SeaFlow*, com a capacidade de gerar uma potência de 300 kW, em correntes de velocidade igual a 2,7 m/s. Esta experiência, resultou na apresentação do primeiro modelo comercial, *SeaGen*, instalado desde Maio de 2008 em Strangford Lough, Irlanda.

O *SeaGen* é o sistema com a maior turbina de maré construída, e utiliza dois rotores gémeos de 16m de diâmetro, capazes de turbinar mais de 200 metros quadrados de fluxo. Os rotores são capazes de atingir mais de 45% de eficiência sobre uma ampla gama de velocidades de corrente, desenvolvendo uma potência nominal de 1.2MW a uma velocidade de corrente igual a 2.4 m/s. O sistema é credenciado, como uma estação de geração oficial do Reino Unido.

Este sistema é destinado ao uso comercial generalizado, tendo variantes na dimensão dos rotores axiais, de 14m a 20m de diâmetro, dependendo das condições do local. Cada rotor, guia um gerador através de uma caixa de velocidades semelhante a uma turbina eólica. Estas turbinas têm uma característica patenteada que permite às pás do rotor girarem 180°, e a sua utilização em fluxos bidireccionais, aproveitando assim as correntes de vazante e enchente. As duas unidades de alimentação são montadas num pilar de aço tubular com 3m de diâmetro, podendo ser elevadas, facilitando as operações de manutenção, [37].



Fig.3.3 – À esquerda: Protótipo *SeaFlow*; À direita: Modelo Comercial *SeaGen*, [38-39].

3.4. HAMMERFEST STRØM

A *Hammerfest Strøm* é uma empresa norueguesa de desenvolvimento de novas tecnologias de energia. Em 2003 instalou em Kvalsund, Norte da Noruega, o protótipo *HS300*, uma turbina de 300kW, tornando-se a primeira turbina de maré a produzir e a converter a energia cinética da água em electricidade, fornecendo-a à rede nacional. O protótipo foi instalado a 50m de profundidade onde a velocidade da corrente é em média de 2.5m/s.

Actualmente possui um modelo pré-comercial, denominado *HS1000*, com uma potência de 1MW, projectado para instalação em águas escocesas inserido num projecto da *European Marine Energy Centre* (EMEC), [40].



Fig.3.4 – À esquerda: protótipo HS300; À direita: Representação do modelo HS1000, [40].

3.5. CLEAN CURRENT

A *Clean Current Power Systems Incorporated* é uma empresa privada Canadiana, que desenvolveu uma parceria com a *ALSTOM Hydro* para o aperfeiçoamento da sua patente. Actualmente a empresa possui três modelos comerciais de turbinas de maré, todos com um diâmetro de 17m, com potências base de 1, 1.5 e 2.2MW para velocidades de 2.6, 3.25 e 4.1m/s respectivamente.

Na costa oeste do Canadá em Race Rocks, encontra-se instalada desde Julho de 2006 uma turbina *Clean Current Generator*. A cerca de 20m de profundidade e com correntes de 3.5m/s, este projecto com uma potência de 65kW, tem como objectivo validar a tecnologia e assegurar o fornecimento de energia à ilha, substituindo dois geradores a diesel, [41].



Fig.3.5 – À esquerda: Turbina *Clean Current Generator*; À direita: ilha do farol de Race Rocks, [41-42].

3.6. LUNAR ENERGY

O sistema denominado *Rotech Tidal Turbine* (RTT), distingue-se pelo facto de o rotor se encontrar no interior de uma conduta Venturi. O equipamento possui lâminas bidireccionais que não permitem ajustes segundo outras direcções. Contudo, o facto de a turbina se encontrar envolta no tubo de Venturi, induz aceleração ao escoamento, maximizando a obtenção de energia, mesmo quando o escoamento não é paralelo ao eixo da turbina. O módulo é preso ao fundo por gravidade, sendo que o rotor pode ser facilmente desmontado para manutenção.

O sistema *RTT* com 1MW de potência por unidade, encontra-se já comercializado, contudo a sua aplicação só será viável em larga escala. Neste sentido existem projectos para o País de Gales e um importante acordo assinado com a *Hyundai Samho Heavy Industries* (HSHI) e a *Korean Midland Power* (KOMIPO) para o desenvolvimento e instalação até 2015, de um campo com 300 unidades *RTT*, na costa da Coreia do Sul, [43].

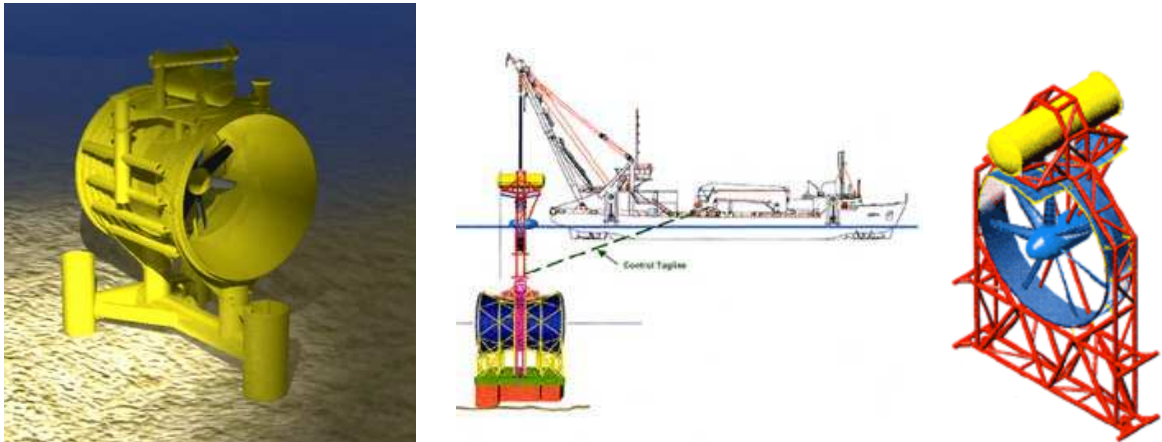


Fig.3.6 – À esquerda: Representação da *RTT*; À direita: Sistema de manutenção, facilitado pela estrutura modular da *RTT*, [43].

3.7. VOITH HYDRO

A *Voith Hydro* possui actualmente um sistema, constituído por uma estrutura capaz de suportar até três turbinas, cada uma com a potência nominal de 1MW. As turbinas podem rodar em torno do seu eixo horizontal, permitindo um maior aproveitamento da alteração do fluxo de água.

Em 2007, a *Voith Hydro* e *REMETEC* acordaram e assinaram um acordo para a produção e comercialização conjunta de turbinas sob o nome *Voith Hydro Tidal Co. Ltd.*. A unidade industrial localiza-se na região de Jeollanam, Coreia do Sul. O trabalho lá desenvolvido está focado na realização de um projecto, que prevê a instalação de um campo de turbinas com uma potência de 600MW.

Um projecto inicial, constituído por um sistema com uma única turbina, instalado a uma profundidade de 30m, requeria uma velocidade de corrente mínima de 3m/s, [44].



Fig.3.7 – À esquerda: Sistema inicialmente desenvolvido pela *Voith Hydro*; À direita: Representação do sistema composto por 3 turbinas previsto para implementação em 2018, [44].

3.8. SMD HYDROVISION

O sistema apresentado por esta empresa designa-se por *TideL*, consiste num par de turbinas com um movimento rotacional em sentidos opostos, ligadas uma a outra, não requerendo um outro tipo de suporte. O conjunto é preso ao fundo no mar por correntes de ancoragem. Este método de fixação permite que as turbinas flutuem e se alinhem automaticamente na direcção da corrente. O rotor tem um diâmetro de 15 m. Os testes ao *TideL* foram efectuados com velocidades de pico da corrente de 2,5 m/s, estando o dispositivo colocado sob águas com 30 m de profundidade. Relativamente à potência, estas duas turbinas apresentam uma capacidade de gerar 1 MW em velocidades mínimas do escoamento, [45].

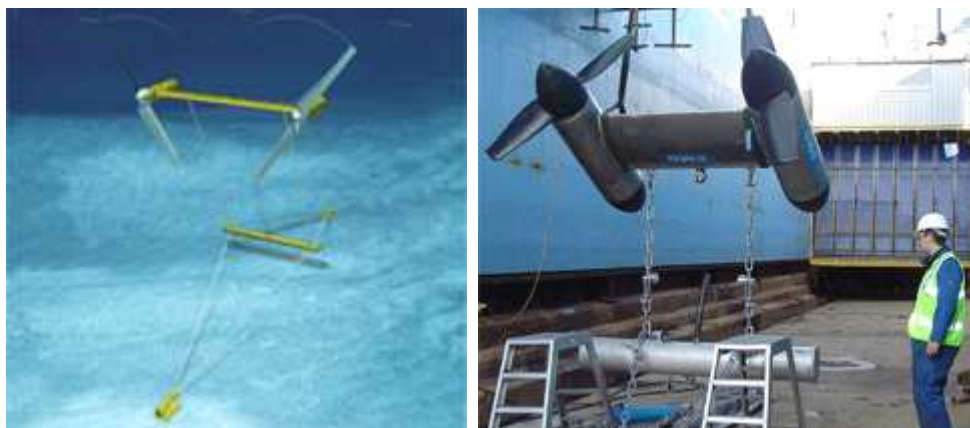


Fig.3.8 – À esquerda: Representação do sistema *TideL*; À direita: Protótipo do *TideL*, [46]

3.9. VERDANT POWER

As turbinas bidireccionais da *Verdant Power*, designadas *Free Flow*, apresentam um diâmetro de 5 m e são constituídas por três lâminas que rodam a uma velocidade de 35rpm, com uma potência de 35kW. A estrutura é suportada por um pilar e colocada em locais onde a profundidade é superior a 9 m (de forma a garantir uma altura livre da lâmina de água de 2.4m). O sistema requer correntes com velocidades superiores a 2 m/s. Actualmente efectuam-se dois projectos-piloto: *RITE Project*, no rio East em Nova York, EUA (desde 2002); e o *CORE Project*, no rio St. Lawrence em Cornwall, Canadá (desde 2007). De destacar que no *RITE Project*, foram instalados em 2006, seis turbinas capazes de produzir 70MWh e enviar essa energia em boas condições a dois utilizadores finais, [47].

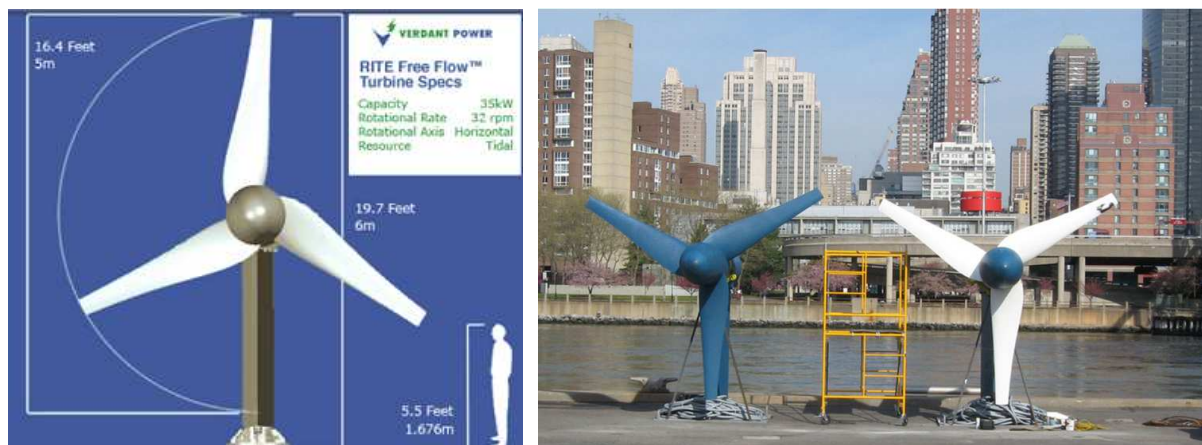


Fig.3.9 – À esquerda: Representação do sistema *Free Flow*, [48]; À direita: Turbinas *Free Flow* em terra, [49].

3.10. TIDAL ENERGY LTD.

As turbinas *DeltaStream*, foram desenvolvidas pela companhia Inglesa, *Tidal Energy Ltd.* O seu sistema com 1.2MW de potência, consiste em três turbinas com 15m de diâmetro, ligadas a uma estrutura estabilizadora, de forma triangular com 30m de largura. Este sistema encontra-se ainda numa fase final de testes, estando planeada a sua produção, [50].

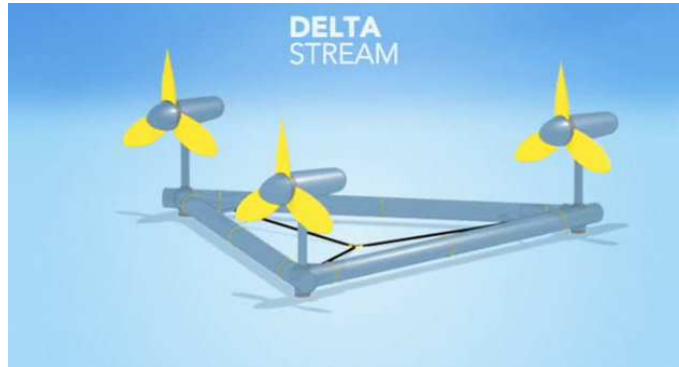


Fig.3.10 – Representação do sistema DeltaStream, [50].

3.11. OCEAN FLOW ENERGY LTD.

A empresa inglesa, *Ocean Flow Energy Ltd.* desenvolveu o sistema *Evopod*. Consiste numa estrutura flutuadora ancorada ao fundo por cabos, onde a turbina é instalada de forma a poder seguir a direcção da corrente. Actualmente o sistema encontra-se em fase de verificação, tendo sido concluídos com sucesso os testes realizados com um modelo à escala 1/10 em Strangford Lough, Irlanda. Neste sentido está prevista a construção de um modelo à escala 1/5 com a capacidade de 22kW e ligação à rede eléctrica, [51].

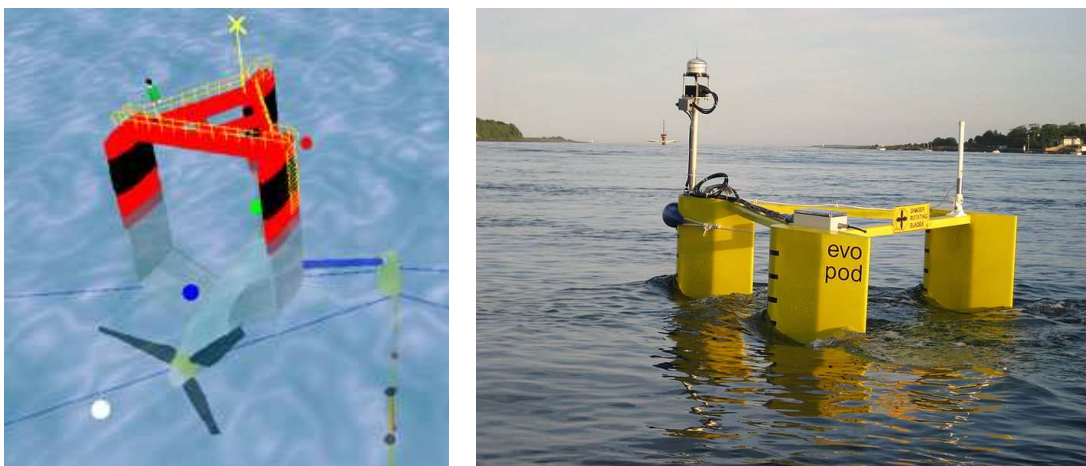


Fig.3.11 – À esquerda: Representação do sistema *Evopod*; À direita: Modelo do *Evopod* à escala 1/10, [52].

3.12. ATLANTIS RESOURCES CORPORATION LTD.

Esta empresa, com representação em Londres, Singapura e Sidney, apresenta três soluções, decorrentes do seu estudo e desenvolvimento, [53].

3.12.1. AK SERIES

Estas turbinas de eixo horizontal foram projectadas para implantação em oceano aberto, nos ambientes mais inóspitos, a uma escala comercial. A serie AK é caracterizada por rotor duplo agregado a pás de passo fixo eliminando a exigência de rotação, de forma a melhorar a sua fiabilidade operacional. A velocidade recomendada para o seu pleno funcionamento está avaliada em 2,6 m/s. Actualmente estão disponíveis dois sistemas com 1 MW e 2MW de potência.

O primeiro destes sistemas, *AK-1000*, com 18m de diâmetro, e 1MW de potência, está em construção, de forma a ser implantado no verão de 2010 no *EMEC*.

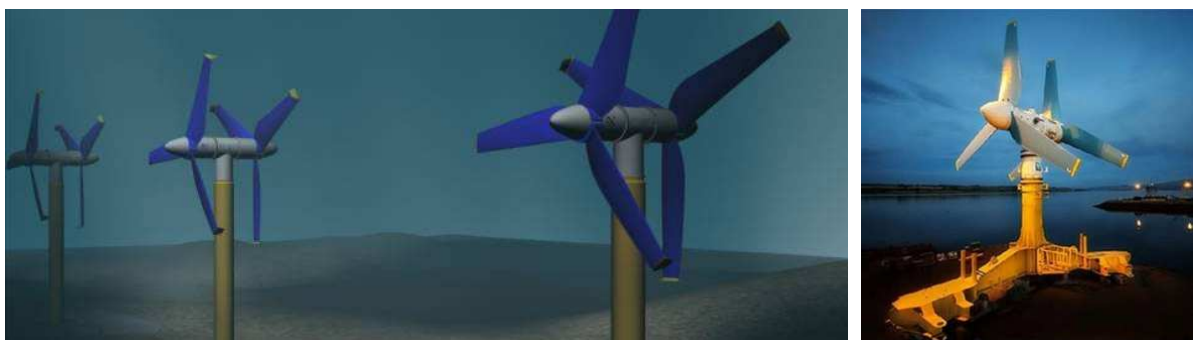


Fig.3.12 – À esquerda: Representação do Sistema AK Series; À direita: Fotografia do equipamento AK-100 antes da sua instalação no EMEC, [53].

3.12.2. AS SERIES

A serie de turbinas AS, também designada por *Solon*, caracteriza-se por ser uma turbina de eixo horizontal canalizadora de corrente, com laminas bi-direccionais, concebida para profundidades superiores a 25m. Actualmente estão disponíveis em configurações com 100kW, 500kW e 1MW, sendo a velocidade de corrente requerida de 2.6m/s.

O *AS-400*, foi o primeiro da série AS, concebido com uma potência de 400kW. Em Agosto de 2008 os testes realizados e os resultados de elevado desempenho obtidos, conferiram-lhe um estatuto reconhecido entre as tecnologias emergentes.



Fig.3.13 – Instalação do sistema AS-400, Singapura, [53].

3.12.3. AN SERIES

O *AN-400*, é o primeiro sistema da série *AN*, e distingue-se pela sua configuração capaz de captar a dinâmica do fluxo da água, conduzindo uma corrente perpendicular ao fluxo. Está dimensionado para águas pouco profundas (menos de 25m), sendo robusto e suportando detritos significativos na corrente. Em San Remo, Austrália, está instalado desde 2006 um sistema com esta tecnologia denominado *Nereus*, com uma potência de 150kW, encontrando-se ligado à rede e que tem sido extensivamente testado.

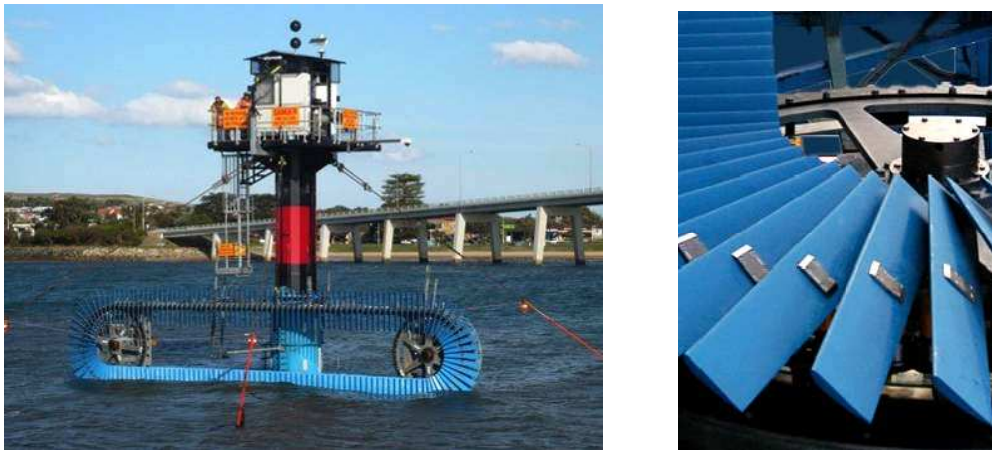


Fig.3.14 – Sistema AN-400, instalado na Austrália, [53].

3.13. HYDRA TIDAL ENERGY TECHNOLOGY AS

Esta empresa norueguesa, em parceria com a *Statkraft*, empresa estatal de energia desse país, desenvolveu um sistema de aproveitamento da energia das marés constituído por uma estrutura de aço flutuante, ancorada de forma convencional. A sua capacidade instalada é de 1MW, dividida por dois geradores, a que estão ligadas duas hélices que giram em sentidos opostos, de forma a não provocar acelerações na estrutura. Os elementos mecânicos podem ser levados à superfície para operações de manutenção, sendo a profundidade mínima de operacionalidade do sistema de 38m, [54].

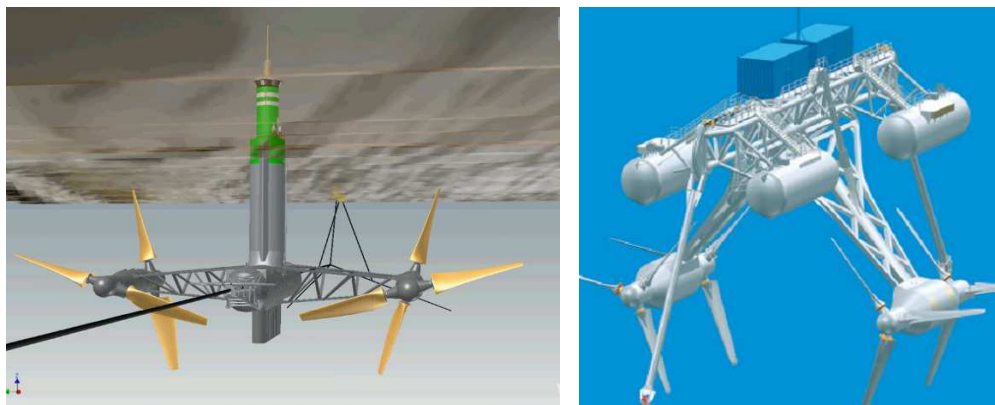


Fig.3.15 – Representação dos sistemas propostos pela *Hydra Tidal*, [55-56].

3.14. SWANTURBINES

O projeto *Swanturbines* foi iniciado em 2001 no Reino Unido, tem como base o desenvolvimento de um mecanismo simples e robusto capaz de aproveitar a energia das correntes com uma potência de 1.8MW. Depois de uma fase conceptual, foram realizados testes num modelo com 1m de diâmetro em condições reais. Encontra-se actualmente a estudar o modelo *Cygnets*, com uma potência de 300kW, instalado no *European Marine Energy Centre* (EMEC), [57].

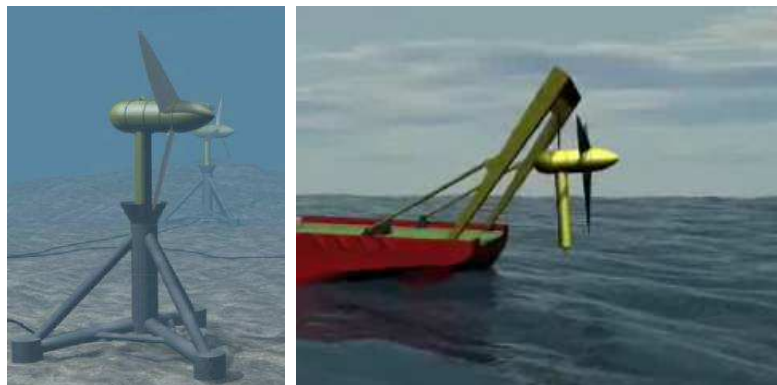


Fig.3.16 – Representação dos sistema *Swanturbines* e do seu processo de instalação, [58].

3.15. UEK CORPORATION

Desde 1981 que a *Underwater Electric Kite* (UEK) desenvolve sistemas de aproveitamento da energia das correntes. Inicialmente com o objectivo da rentabilização da energia das correntes dos rios, estudou posteriormente a aplicação do seu sistema para o aproveitamento da energia das marés e das correntes oceânicas.

Após explorar várias configurações, construir e testar diversos protótipos, chegaram a um sistema final acoplando duas turbinas com 2.4m de diâmetro, capazes de desenvolver uma potencia de 90kW para uma velocidade de corrente iguais a 2.5m/s, podendo operar numa gama compreendida entre 2 e 4m/s, [59].

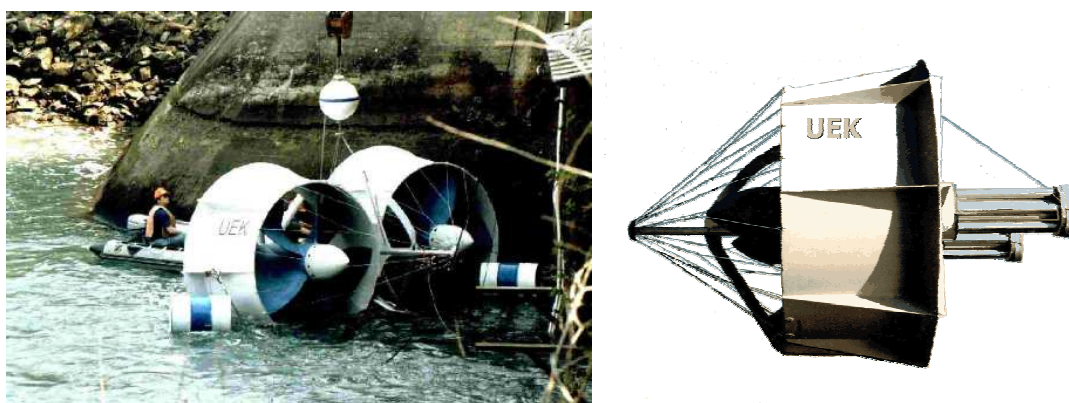


Fig.3.17 – Fotografias do sistema *UEK Dual Hydroturbine Unit*, [59].

3.16. SABELLA

O consórcio francês *Sabella*, desenvolveu um projecto que consistiu na concepção, construção e teste em mar, de uma turbina de maré à escala de 1:3, do futuro modelo comercial. Esta turbina com 3m de diâmetro, foi testada durante determinados períodos no ano de 2008 e 2009, no Estuário de Bénodet, França. Estes testes experimentais tiveram como objectivo validar e consolidar o desenvolvimento do projecto *Sabella D10*, concebido como pré-modelo industrial, com um diâmetro de 10m, produzindo entre 200 a 500 kW, de acordo com a energia cinética das marés do local de instalação, [60].



Fig.3.18 – À esquerda: Protótipo *Sabella D03*; À direita: Representação do *Sabella D10*, [60].

3.17. NEPTUNE RENEWABLE ENERGY

Esta empresa desenvolveu o *Neptune Proteus NP1000*, que consiste numa turbina de eixo vertical inserida num difusor Venturi de 6x6m de abertura. Segundo a empresa esta configuração quadrangular gera até 30% mais energia por unidade do que uma circular. Esta estrutura é concebida para flutuar, sendo facilitadas as tarefas de manutenção e reparação. A sua instalação deve ter em atenção a protecção face à ondulação e é sugerida para locais com velocidades de corrente de pico em marés vivas, superiores a 2.5m/s.

Actualmente o *Neptune Proteus* encontra-se em fase de testes, no Estuário de Humber no rio Hull, esperando-se ser capaz de gerar pelo menos 1000 MWh anualmente, [61].



Fig.3.19 – À esquerda: Construção da Estrutura flutuadora, [62]; À direita: Representação de um corte da estrutura onde se pode observar a turbina de eixo vertical no seu interior.

3.18. LUCID ENERGY TECHNOLOGIES

A *Lucid Energy Technologies* é uma empresa que desenvolve sistemas de aproveitamento de energias renováveis. Desde 2007 que se aliou à *GCK Technology Inc.*, apresentando um sistema de aproveitamento da energia das marés baseado na patente da *Gorlov Helical Turbine*, para o qual desenvolveu 3 sistemas de dimensões distintas, [63]. A dimensão da maior turbina é de 2x5m e tem a capacidade de atingir uma potência de 117kW para velocidades de corrente de 4.5m/s, Figura 3.20.

A *Gorlov Helical Turbine*, foi desenvolvida pelo Professor Alexander M. Gorlov da Universidade de Northeast, ganhou em 2001 o *Thomas A. Edison Patent Award*, e tem como principal característica ser uma turbina de eixo helicoidal, baseada na turbina Darreus, concebida na década de 1930. A sua utilização é praticável para velocidades de corrente superiores a 0.6m/s, sendo uma turbina com 1m de diâmetro e 2.5m de altura, capaz de gerar até 5 kW de potência, independentemente da direcção da corrente, [64].

Esta turbina pode ser usada na posição vertical ou horizontal com um rendimento bastante elevado, é fabricada em alumínio e revestida com uma camada de material anti-aderente, reduzindo desta forma o atrito da água e evitando a acumulação de crustáceos e detritos. O ângulo e distanciamento entre as pás, permitem a passagem de peixes, não contribuindo para a degradação do meio ambiente.

As turbinas *Gorlov* têm sido testadas em plataformas marítimas e na produção de electricidade para abastecer pequenas propriedades rurais nas regiões ribeirinhas dos EUA, China e Coreia do Sul, [65].

O Professor Alexander M. Gorlov, foi consultor de um projecto de instalação de uma turbina helicoidal de 6 pás na ilha de Combu, foz do rio Amazonas. Apesar de ter dimensões reduzidas, 1.1m de diâmetro e 0.8m de altura, a sua fácil e barata construção garante uma excelente opção de geração de energia para zonas isoladas, face ao custo superior dos painéis solares e o elevado custo operacional de geradores a diesel, [66].



Fig.3.20 – À esquerda: Representação da *Gorlov Helical Turbine*, [63]; No centro: Instalação de teste em Vinalhaven Island, EUA, 2003; À direita: Aplicação da turbina helicoidal na ilha de Combu, Brasil, 2002, [66].

Em 2002 este sistema foi instalado no estreito Uldomok na costa sudoeste da Coreia do Sul, de forma a analisar a sua viabilidade em condições naturais. Após o sucesso deste sistema, foi iniciada em 2005 a segunda fase do projecto, com a instalação de 15 turbinas, com uma capacidade total de 1MW. Este projecto, denominado *Uldolmok Power Plant* tem o objectivo de atingir em 2020 uma potência instalada de 90MW, [67].



Fig.3.21 – À esquerda, estação de produção de energia através das correntes de maré, à direita representação geral do projecto, Uldomok, Coreia do Sul, [67].

3.19. OCEAN RENEWABLE POWER COMPANY - ORPC

Esta empresa norte americana apresenta diferentes configurações de sistemas de aproveitamento da energia das correntes dos rios e oceânicas, baseados em turbinas helicoidais de eixo horizontal. Actualmente desenvolve vários projectos para a implementação destes sistemas, destacando-se a instalação e produção de energia na baía de Fundy, Canadá e o projecto para a instalação de um sistema com uma potência de 5MW na baía de Cobscook, EUA.

O *TidGen Power System*, é o sistema apresentado pela ORPC capaz de gerar energia através dos fluxos de maré. Para a sua instalação necessita de uma profundidade superior a 15m e é capaz de gerar 250kW para um fluxo de corrente igual a 3m/s, [68].

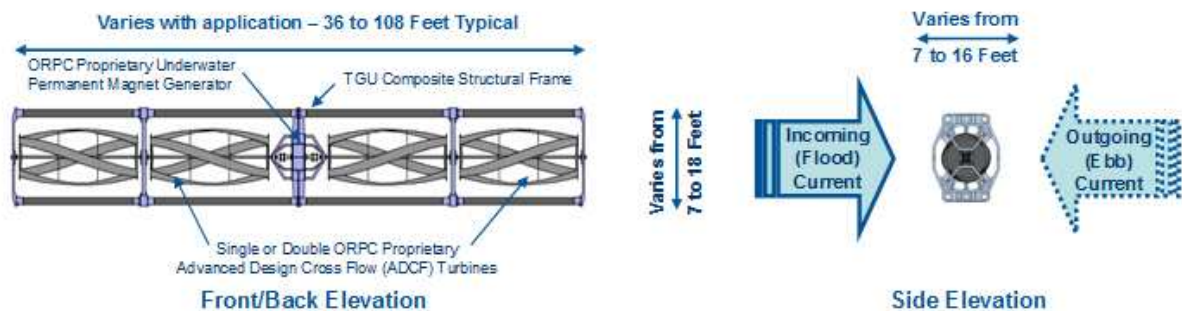


Fig.3.22 – Representação do sistema *TidGen Power System*, [68].

3.20. BLUE ENERGY

A *Blue Energy* é uma empresa canadiana investidora em sistemas de aproveitamento da energia das marés, que promove várias soluções, das quais se destaca o desenvolvimento da *Davis Hydro Turbine*.

Esta turbina é constituída por quatro lâminas verticais e está inserida numa estrutura que é ancorada ao fundo do mar. A estrutura, para além de direccionar o escoamento para a turbina, suporta os outros componentes do sistema como a caixa de engrenagens e o gerador. Este sistema foi testado em

condições naturais com modelos 4 e 100 kW de potência. A sua viabilidade foi estudada para velocidades médias de 1.75 m/s. Estas turbinas têm a particularidade de poderem ser acopladas, formando uma barreira numa secção vertical, permitindo uma produção energética em grande escala. Esta estrutura modular é apresentada como uma mais-valia devido à facilidade de instalação e manutenção, recentemente esta empresa apresentou uma solução comercial deste sistema com 125kW de potência, [69].

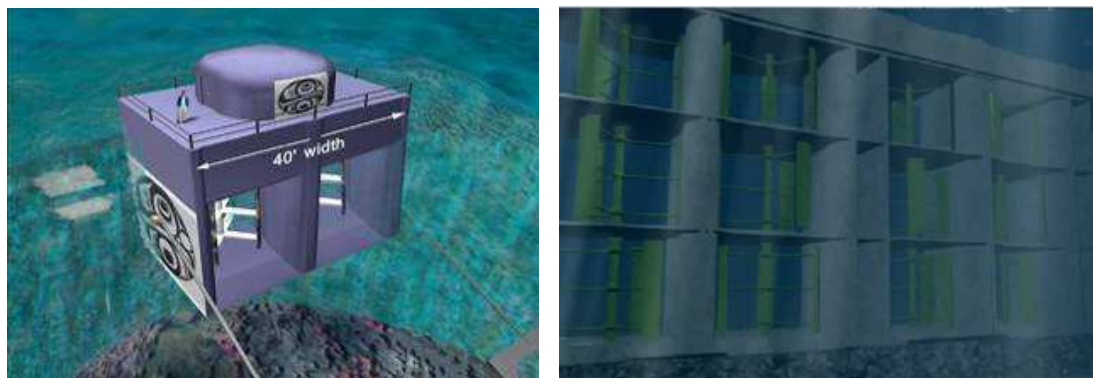


Fig.3.23 – À esquerda: Representação do sistema flutuador ancorado por cabos ao fundo marinho; À direita: Sistema de varias turbinas acopladas, formando uma barreira submersa, [69].

3.21. PONTI DI ARCHIMEDE INTERNATIONAL SPA

Esta empresa italiana apresenta uma turbina de eixo vertical com um rotor de 6m de diâmetro, três lâminas verticais de 5m e uma potência de 160 kW a uma velocidade de corrente de 3,5 m/s. O sistema é montado debaixo de uma plataforma flutuante, presa através de correntes, onde se encontra o gerador de energia eléctrica. Em 2004, a turbina-piloto *Kobold* foi instalada no estreito de Messina, Itália, numa zona de profundidade superior a 18m. Esta turbina pode gerar uma potência de 20 kW a uma velocidade de corrente de 1,8 m/s, necessitando de valores de velocidades do fluxo superiores a 1 m/s. Em 2006 foi iniciado um projecto para instalação de uma turbina com a potência de 0.25MW no estreito de Jintang, China e em 2009 assinado um acordo para um projecto de demonstração na Indonésia em cooperação com a *United Nations Industrial Development Organization* (UNIDO), [70].



Fig.3.24 – À esquerda: Representação do sistema *Kobold*, [71]; À direita: Fotografia do sistema em funcionamento, Itália.

3.22. TIDAL ENERGY PTY LTD

Criada em 1998 a *Tidal Energy Pty Ltd*, teve como objectivo o desenvolvimento da turbina de eixo vertical designada *Davidson-Hill Venturi Turbine*. A sua característica principal assenta na utilização de uma estrutura de entrada do escoamento baseada no tubo de Venturi na qual está inserida uma turbina de eixo vertical. O sistema pode ser montado no fundo do mar ou ancorado de forma a flutuar na corrente. Foi ensaiado um modelo à escala na Austrália e actualmente esta empresa oferece uma gama comercial com uma abertura variável entre 2.25 m² e 100 m², com uma potência variável de 0.77kW para 1m/s e 7MW para uma velocidade de 6m/s e a maior abertura, [72].

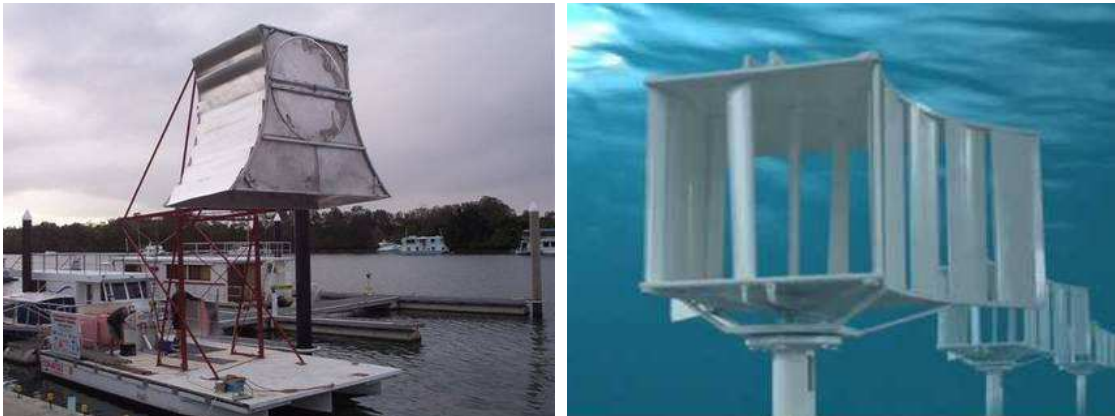


Fig.3.25 – À esquerda: Modelo de testes emerso, Austrália; À direita: Representação do sistema “Davidson-Hill Venturi Turbine” em funcionamento, [72] .

3.23. BIOWPOWER SYSTEMS PTY LTD

Esta empresa Australiana propõe um sistema inovador para aproveitamento da energia das correntes de maré, denominado *bioSTREAM* baseado na eficiência da barbatana caudal do tubarão, imitando a forma e as características do movimento desta. O sistema encontra-se fixo, sendo movimentado pelo fluxo de água que passa através dele, produzindo desta forma energia. Devido ao único ponto de rotação, este dispositivo pode alinhar-se com qualquer direcção do fluxo e assumir uma configuração optimizada para evitar excesso de carga em condições extremas.

Actualmente estão em desenvolvimento sistemas com a potência de 250kW, 500kW, e 1000kW consoante as condições do local de instalação. Este sistema foi testado em laboratório à escala 1/20.

Para 2010 está previsto um projecto-piloto com a capacidade de 250kW e ligação à rede de distribuição, para instalação deste equipamento na Tasmânia, Austrália, [73].



Fig.3.26 – Sistema *bioSTREAM*, na imagem à direita é possível perceber sua dimensão devido a uma comparação com uma pessoa no apoio da estrutura, [73].

3.24. PULSE TIDAL

A *Pulse Tidal* desenvolveu o aproveitamento da energia das marés com base no sistema *Pulse*, em que os fluxos de maré movem duas lâminas horizontais para cima e para baixo. O sistema *PS100* com uma capacidade de 100kW, encontra-se numa fase de testes, instalado numa plataforma no estuário do Humber, que fornece energia a uma empresa de produtos químicos nas margens do rio. Actualmente está garantido o financiamento para a construção em 2012, de um gerador comercial com 1MW de potência, [74].



Fig.3.27 – À esquerda e no centro: Sistema *PS100*, [75]; À direita: Representação do sistema comercial com 1MW de potência.

3.25. ROBERT GORDON UNIVERSITY

Esta Universidade inglesa desenvolveu um sistema de aproveitamento da energia das marés designado *Sea Snail*, que consiste numa turbina de eixo horizontal assente numa estrutura com 15x12m de dimensões, constituída por seis asas hidrodinâmicas que captam a força descendente do fluxo marítimo aumentando a sua estabilidade face ao solo, podendo desta forma ser instalada no local de exploração apenas com uma regularização mínima do fundo marítimo, [76].

Encontra-se desde 2005 um protótipo deste engenho em Eynhallow Sound, Orkney, ao largo do norte da Escócia, com uma capacidade instalada de 150kW. O *Sea Snail* pode ser instalado em locais cuja profundidade é menor do que 25 m, sendo o sistema projectado para uma potência instalada máxima de 750kW, [77].



Fig.3.28 – Fotografias do sistema *Sea Snail* em terra, [76].

3.26. THE ENGINEERING BUSINESS LTD

O sistema desenvolvido por esta empresa, denominado *Stringray*, consiste numa estrutura oscilante em que o ângulo de ataque da asa em relação ao fluxo de maré é ajustado através de cilindros hidráulicos, de modo a otimizar o seu rendimento.

A produção de energia processa-se com a passagem da corrente através do hidropilano, imprimindo forças de impulsão na asa e provocando a sua elevação linear. Este movimento de oscilação do braço que suporta a asa activa o gerador eléctrico através de cilindros hidráulicos. Ao atingir a posição mais elevada, o hidropilano é reposicionado na sua posição inferior através de uma inversão do ângulo de ataque, permitindo que o ciclo recomece. O sistema *Stringray* apresenta uma altura de 24m, um hidropilano de 15m e uma potência de 150kW em correntes com velocidade de 3m/s. Um protótipo deste modelo foi testado no Yell Sound, na Escócia, entre 2002 e 2003, contudo face à não previsível comercialização deste sistema, o projecto encontra-se actualmente suspenso, [78-79].



Fig.3.29 – Fotografia (à esquerda) e representação (à direita) do sistema *Stringray*, [79].

3.27. VORTEX HYDRO ENERGY

O sistema desenvolvido pela *Vortex Hydro Energy* assenta no aproveitamento da energia dos vórtices formados na corrente, a jusante de obstáculos arredondados. Estes vórtices criam um desequilíbrio de pressão resultando num movimento oscilatório de cilindros, e desta forma, a energia mecânica é transformada em energia eléctrica através de um gerador acoplado à estrutura. A oscilação dos cilindros é lenta, cerca de um ciclo por segundo, não sendo uma ameaça directa à vida marinha.

Este sistema denomina-se *VIVACE*, é composto por pequenos módulos, funcionando para velocidades de corrente superiores a 1m/s. Após vários testes realizados com sucesso em modelos no laboratório da Universidade de Michigan, irá ser instalado um equipamento deste tipo no rio Detroit, EUA, com uma capacidade de 10kW, [80]. A capacidade deste equipamento está avaliada em 2kW de potência por metro cúbico para uma velocidade de corrente igual a 3m/s, [81].

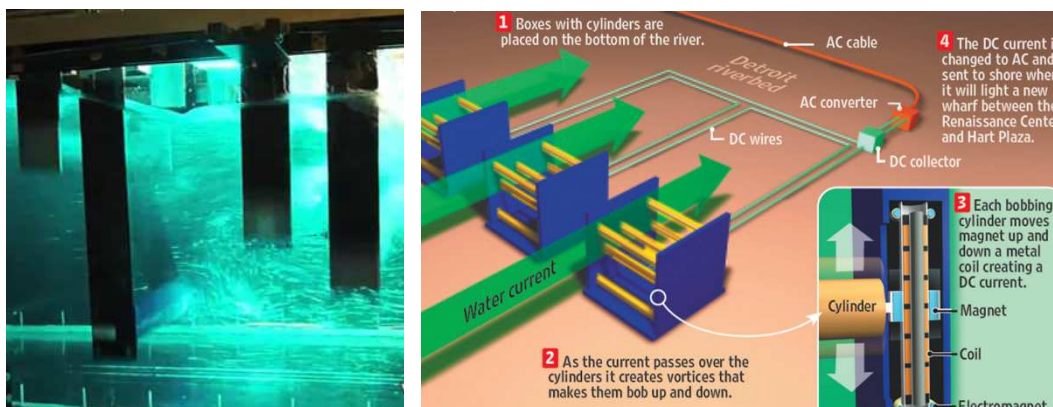


Fig.3.30 – À esquerda: Fotografia de um ensaio laboratorial de quadro cilindros que oscilam na vertical sujeitos a uma corrente horizontal, EUA; À direita: Esquema do funcionamento do sistema VIVACE, [80].

3.28. C-ENERGY

Este consórcio holandês, desenvolveu um sistema capaz de conjugar o aproveitamento da energia das marés e das ondas. A fim de explorar esta energia, são combinados dois rotores, um rotor Darrieus com pás oblíquas e um rotor de Wells, com pás radiais. A energia é directamente convertida em movimento de rotação, que acciona um gerador. As pás do protótipo deste sistema varrem uma área de 25m^2 , tendo uma potência de 30kW , para uma velocidade média de 2m/s ,

Devido ao facto de grande parte do sistema se encontrar a seco, apresenta uma construção simples e robusta, tendo ainda a vantagem de ter uma pequena área de superfície exposta à corrente, reduzindo a carga em condições extremas de tempestade, [82].

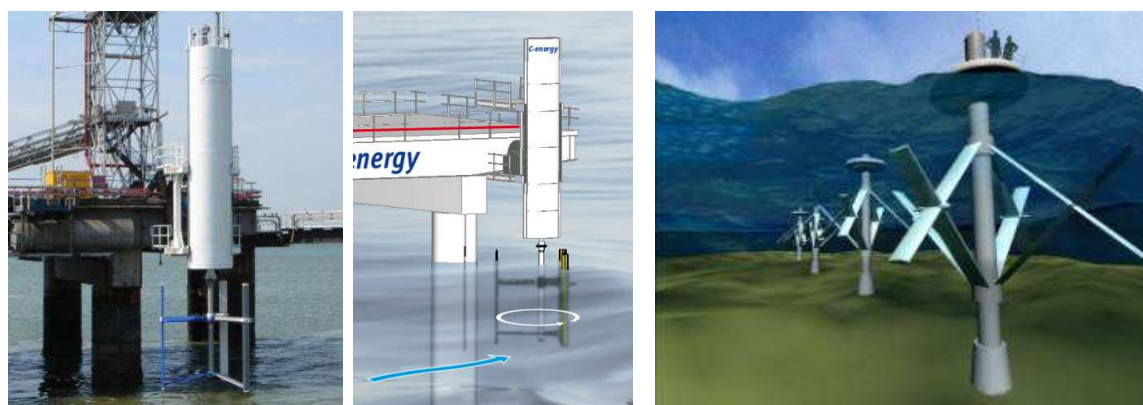


Fig.3.31 – À esquerda e no centro: Sistema de demonstração da tecnologia instalado no delta do rio Westerschelde, Holanda; À direita: Representação do sistema comercial, [83].

3.29. MINESTO

A Minesto é uma spin-off do grupo Saab formada em 2007, que desenvolveu um novo conceito para o aproveitamento da energia das marés chamado *Deep Green*. Esta tecnologia é baseada numa turbina acoplada a uma asa de 12m que se movimenta automaticamente de forma a maximizar a energia

gerada pela turbina, aumentando em cerca de 10 vezes a velocidade do fluxo de água na turbina. Este conjunto de 7 toneladas encontra-se ligado por um cabo ancorado ao fundo marinho pelo qual é transportada a energia. O sistema tem uma potência instalada de 0.5MW, sendo viável para velocidades de corrente na ordem dos 1.6m/s e para profundidades entre 60 e 150m, [84].



Fig.3.32 – À esquerda: Representação do sistema Deep Green; À direita: Fotografia dos testes realizados com um protótipo deste sistema no laboratório do “Maritime Research Institute Netherlands”, [84].

3.30. ENERGY SYSTEMS RESEARCH UNIT - UNIVERSITY OF STRATHCLYDE

O desenvolvimento do sistema *Contra-Rotating Marine Turbine* (CoRMaT) foi iniciado na Universidade de Strathclyde, Glasgow, tendo sido concluído o primeiro protótipo em Fevereiro de 2007. O sistema é composto por uma turbina flutuante de eixo horizontal composta por dois rotores, que se movem em direcções opostas. Esta configuração tem como objectivos reduzir a força de ancoragem, a turbulência de fluxo e aumentar a eficiência na captura de energia. A turbina foi projectada para profundidades superiores a 40m e encontra-se ancorada através de um cabo ao fundo, orientando-se assim na direcção da corrente.

Foram efectuados ensaios em laboratório com um modelo à escala 1/30, e posteriormente foram construídos dois modelos à escala 1/10, um para estudar o comportamento do rotor e outro para análise da viabilidade geral do sistema. Actualmente o programa de testes encontra-se em desenvolvimento, sendo os resultados até agora analisados bastante promissores, [85].



Fig.3.33 – À esquerda: Representação do sistema CoRMaT; No centro: Modelo à escala 1/10 para teste do rotor; À direita: Modelo à escala 1/10 de análise do comportamento geral do sistema, [85].

3.31. TIDAL STREAM

Fundada em 2005 no Reino Unido, a *Tidal Stream* desenvolveu um sistema de aproveitamento da energia das correntes de maré que assenta numa plataforma flutuadora designada *Triton*. Esta plataforma à qual podem ser acopladas 6 turbinas de eixo horizontal, reduz em grande parte o custo de implantação do sistema para o qual não são necessários mergulhadores. A plataforma funciona na vertical como se observa na Figura 3.33. Contudo, para facilitar as operações de manutenção pode ser disposta na horizontal, flutuando como um catamarã de forma a por a seco as turbinas.

A plataforma *Tricon* pode ter uma potência até 10MW quando instaladas as 6 turbinas em profundidades superiores a 60m e com uma velocidade de corrente máxima na ordem dos 8m/s. Em Pentland Firth, Escócia, estão reunidas estas condições que viabilizaram a aprovação de um projecto que prevê a instalação deste sistema.

O desenvolvimento deste sistema passou por testes em modelo à escala 1/20, em 2008, com dois rotores à escala e posteriormente em 2009 a análise do despenho da estrutura composta por seis rotores, testada num tanque de águas profundas no *Institut Français de Recherche pour l'exploitation de la Mer* (Ifremer), França, [86].

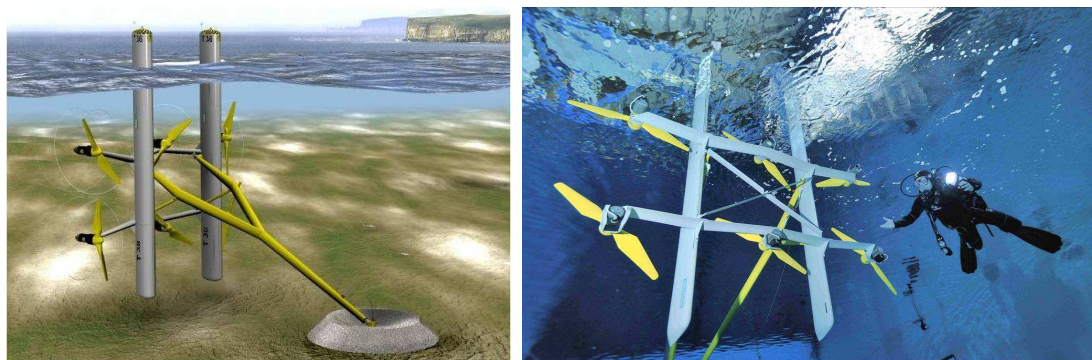


Fig.2.34 – À esquerda: Representação do sistema *Tricon*; À direita: Testes realizados no *Ifremer*, [86].

3.32. HYDRO GREEN ENERGY

Esta empresa americana desenvolveu uma tecnologia de aproveitamento da energia das marés baseada no seu conhecimento de aproveitamento de energia das correntes dos rios. O conceito apresentado baseia-se num sistema modular com um rotor de 3.6m de diâmetro e uma potência de 98kW para velocidades de corrente iguais a 3.5m/s. O sistema pode ser instalado numa estrutura porticada flutuante, facilitando operações de manutenção ou em módulos submergíveis de forma a criar campos de geração de energia, [87].

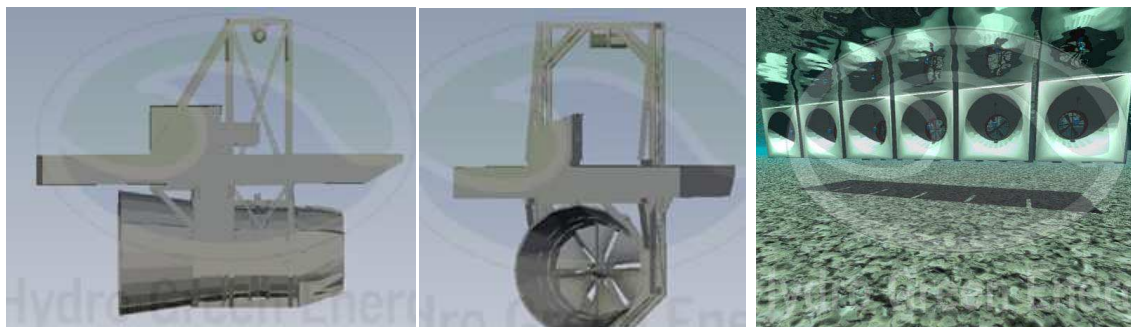


Fig.3.35 – À esquerda: Sistema instalado numa estrutura flutuante; À direita: Representação do sistema composto por vários módulos acoplados, [87].

3.33. FRI-EL SEA POWER

Esta empresa italiana apresenta um dispositivo composto por uma estrutura flutuante à qual estão ligados vários módulos de turbinas de eixo horizontal em intervalos regulares. A ligação é realizada através de um tubo que funciona como eixo de transmissão da energia captada e a transfere ao gerador eléctrico instalado na plataforma flutuante. Desta forma nenhum componente eléctrico se encontra submerso, aumentando a fiabilidade do sistema.

O sistema tem sido testado e optimizado no túnel de vento e no tanque de testes da Universidade de Nápoles “Federico II” recorrendo a modelos à escala. Actualmente encontra-se em fase avançada de desenvolvimento um protótipo com uma potência de 500kW que será instalado no Estreito de Messina, onde a velocidade das correntes atinge picos de 2.5m/s. Este protótipo será composto por um navio e quatro tubos alinhados, cada um com cinco turbinas de 4m de diâmetro, [88].

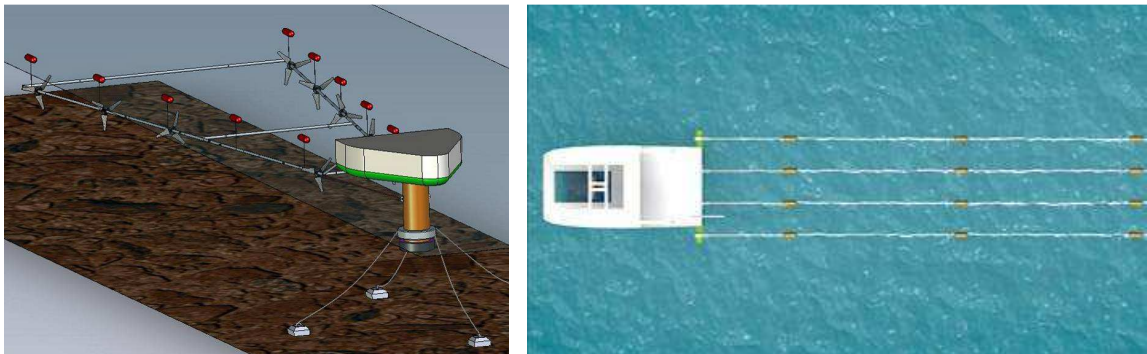


Fig.3.36 – À esquerda: Representação do sistema composto por dois tubos; À direita: Sistema ligado a um navio composto por quatro tubos, [88].

3.34. CURRENT POWER AB

A *Current Power AB* é uma empresa sueca que se formou em 2005 como resultado da pesquisa realizada durante vários anos na Universidade de Uppsala, Suécia. O conceito baseia-se num sistema robusto de construção mecânica simples, composto por uma turbina de eixo vertical directamente acoplada a um gerador síncrono instalado na base. Destina-se a ser colocado no fundo marinho, onde estará mais protegido contra tempestades e ondas fortes.

Os testes realizados pela *Current Power AB* incidiram num protótipo com uma potência nominal de 5kW a 10rpm. O próximo passo anunciado deste projecto é instalar e testar todo o sistema em ambiente marinho, [89].

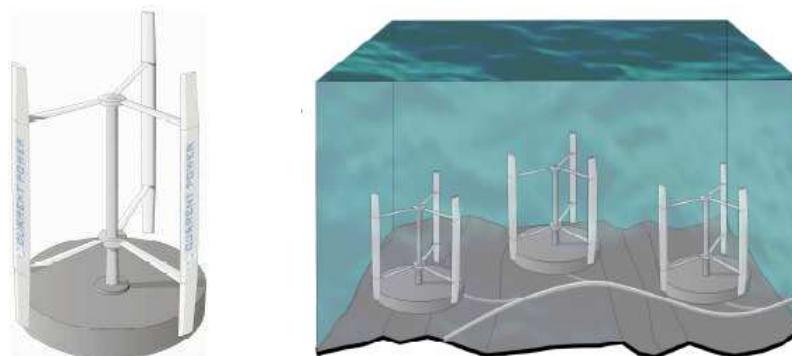


Fig.3.37 – Representação do sistema proposto pela *Current Power AB*, [89].

3.35. NEW ENERGY CORPORATION INC.

A tecnologia desenvolvida por esta empresa Canadiana baseia-se na turbina de Darrieus e designa-se por *EnCurrent*. A *EnCurrent* é uma turbina de eixo vertical, com um rendimento na ordem dos 35% que gira na mesma direcção independentemente do fluxo da corrente.

O crescimento desta empresa orientado e sustentado no aproveitamento da energia da corrente dos rios, viabilizou sistemas de menor dimensão. Actualmente a gama comercial *EnCurrent* apresenta sistemas com potência de 5kW, 10kW e 25kW, para velocidades de fluxo de 3m/s. O sistema de 5kW de potência já se encontra instalado em alguns pontos da América do Norte, estando planeada a instalação de mais sistemas de aproveitamento da energia das correntes. De referir que em Pointe du Bois, Canadá, se encontra instalado desde 2008 um sistema de 5kW e 25kW de potência.

Para o ano de 2010 está anunciado o lançamento de dois novos modelos com 125kW e 250kW, este último terá uma altura das pás e um diâmetro do rotor de 7.6m, [90].



Fig.3.38 – À esquerda: Representação do sistema *EnCurrent*; À direita: *EnCurrent* de 5kW de potência, [90].

3.36. HIDROCIÑÉTICA ENGENHARIA LTDA

O aproveitamento da energia dos fluxos de corrente dos rios tem sido testado e estudado de forma efectiva desde 1970. Contudo projectos comerciais em grande escala têm se mostrado inviáveis, devido às condições naturais de espaço e de manutenção dos equipamentos. Sendo esta tecnologia, em parte, semelhante à do aproveitamento da energia cinética das correntes de maré, refere-se a título de exemplo a empresa brasileira Hidrocinética Engenharia Ltda. Esta, em parceria com a Universidade de Brasília, tem actualmente quatro turbinas implementadas em zonas ribeirinhas isoladas do Brasil, onde este tipo de tecnologia se torna competitivo em relação aos geradores a diesel. Actualmente o sistema desenvolvido com 1.2m de diâmetro tem uma potência de 2 kW, [91].



Fig.3.39 – À esquerda: Fotografia do sistema emerso; À direita: representação da estrutura flutuadora, [91].

3.37. PEEHR

A PEEHR, Produtora de Energia Eléctrica Por Hidro-Reação, é uma empresa portuguesa que surgiu em 1998 dando seguimento a uma ideia de 1995 para o aproveitamento da energia das correntes de maré. Apresenta dois sistemas patenteados, um vocacionado para instalação em rios e outro para águas mais profundas, para o qual, em 2002, foram realizados ensaios com um protótipo no estuário do porto de Peniche.

O sistema apresentado denomina-se Hidroreactor, consiste numa hélice inserida num ducto cilíndrico que é mantido imerso, ligado a uma plataforma elevatória (para facilitar operações de manutenção) que se liga à base inerte ancorada ao fundo. O ducto permite gerar um escoamento caracterizado por uma carga significativamente superior à carga da corrente, promovendo o aproveitamento da energia das correntes num maior número de locais.

O maior sistema proposto apresenta uma hélice de 2m de diâmetro inserida num ducto de 9x14m, sendo capaz de gerar uma potência de 115kW para velocidades de corrente iguais a 3m/s, [92].

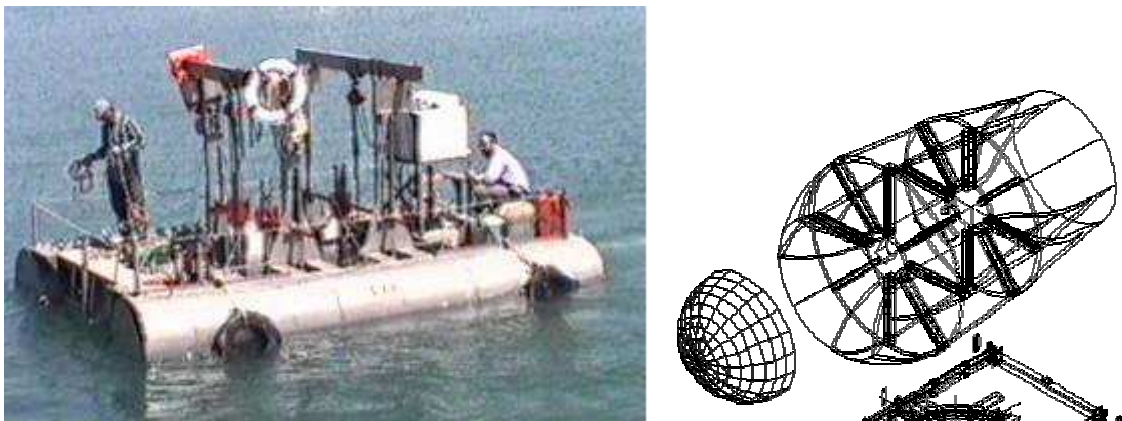


Fig.3.40 – À esquerda: testes com o protótipo, Peniche; À direita: representação do sistema Hidroreactor, [92].

3.38. OUTRAS ORGANIZAÇÕES

Para além das empresas que se dedicam ao desenvolvimento de sistemas capazes de um aproveitamento eficiente da energia cinética dos fluxos de corrente, existem outras organizações com competências noutras áreas que ajudam a viabilizar projectos deste tipo.

- *European Marine Energy Centre (EMEC)* – este centro de pesquisa situado na Escócia está na vanguarda no desenvolvimento de energias renováveis baseadas no mar (ondas e fluxos de corrente). Oferece às empresas que desenvolvem sistemas tecnológicos a oportunidade de os testarem em grande escala num local com condições de maré privilegiadas. Para isso foram construídos propositadamente vários cais de teste, que se encontram ligados por cabos submarinos à rede nacional do Reino Unido;
- *U.S. Department of Energy, Energy Efficiency and Renewable Energy* - Departamento governamental nos EUA, que fomenta vários projectos deste tipo e possui uma base de dados bastante completa do desenvolvimento de novos sistemas tecnológicos;
- *Ocean Renewable Energy Coalition (OREC)* – é uma associação comercial dos EUA dedicada exclusivamente à promoção de tecnologias de energias renováveis obtidas nos oceanos.

Actualmente tem como objectivo criar um regime legislativo e regulamentar nos EUA, que promova o desenvolvimento comercial destas tecnologias;

- *IEA Ocean Energy Systems (OES-IA)* – esta organização visa facilitar a execução de pesquisas na área das energias renováveis ligadas aos oceanos, através do incentivo ao desenvolvimento e à cooperação internacional, levando à implantação e comercialização dos sistemas que demonstrem ser sustentáveis;
- *National Renewable Energy Centre (NAREC)*, é uma organização do Reino Unido dedicada a acelerar a implantação e integração da rede de energias renováveis e tecnologias de baixo carbono;
- *Aotearoa Wave and Tidal Energy Association (AWATEA)* – é uma associação da Nova Zelândia que representa e defende os interesses da indústria e da investigação em energia marinha e seus usos.

Destacam-se também algumas conferências internacionais que abordam mais especificamente este tema:

- *Internacional Tidal Energy Conference*;
- *European Wave and Tidal Energy Conference*;
- *Global Marine Renewable Energy Conference*.

3.39. QUADRO RESUMO

Para facilitar a identificação e adequação de cada tecnologia ao meio em estudo é apresentado no Quadro 3.1 o resumo das principais características dos equipamentos expostos anteriormente. Assim como as anteriormente descritas, as restantes empresas ou organizações não referenciadas neste trabalho, envolvidas directamente na procura de soluções para o aproveitamento da energia das correntes hidrodinâmicas, encontram-se simplesmente identificadas no Anexo 2.

Quadro 3.1 – Resumo das características dos equipamentos analisados.

Empresa / Organização	Nome da Tecnologia	Tipo de turbina	Estado de Desenvolvimento	Dimensões	Velocidade	Sistema de Ancoragem	Potência por unidade
Open Hydro	Open-Centre Turbine	TEH Ducto	Protótipo	φ 6m	-	Estacas	250kW
			Comercial	φ 16m			1MW
Marine Current Turbines Ltd	SeaFlow	TEH x2	Protótipo	φ 14 a 20m x2	2.7 m/s	Mono Pilar	300kW
	SeaGen		Comercial		2.4 m/s		0.8 a 1.8MW
Hammerfest Strøm	HS300	TEH	Protótipo	-	2.5 m/s	Base de fundação	300kW
	HS1000		Pré-comercial				1MW
Clean Current	Clean Current Generator	TEH Ducto	Pré-comercial	φ 17m	2.6 m/s	Base de fundação	1MW
					4.1 m/s		2.2MW

Quadro 3.1 – Resumo das características dos equipamentos analisados (continuação).

Empresa / Organização	Nome da Tecnologia	Tipo de turbina	Estado de Desenvolvimento	Dimensões	Velocidade	Sistema de Ancoragem	Potência por unidade
Lunar Energy	Rotech Tidal Turbine	TEH Venturi	Pré-comercial	ϕ 11.5m (15x19.2m ²)	-	Base de fundação	1MW
Voith Hydro	-	TEH x3	Projecto	-	3 m/s	Estacas pilar	1MW
SMD Hydrovision	TidEL	TEH x2	Protótipo Projecto	ϕ 15m x 2	2.5 m/s	Kite ancorado ao fundo	1MW
Verdant Power	Free Flow	TEH	Comercial	ϕ 5m Prof. > 9m	2 m/s	Mono Pilar	35kW
Tidal Energy Ltd	DeltaStrem	THE x3	Projecto	ϕ 15m x 3	-	Base de fundação	1.2MW
Ocean Flow Energy Ltd	Evopod	TEH	Protótipo Projecto	Escala 1/5 ϕ 18m	-	Estrutura flutuante	22kW 1.5MW
Atlantis Resources Corporation Ltd	AK Series	TEH	Projecto	ϕ 18m	-	2.6 m/s	1MW
	AS Series	TEH Ducto	Protótipo	Prof. >40m			400kW
	AN Series	-	Protótipo	Prof. <25m			150kW
Hydra Tidal Energy Technology AS	Morild	TEH x4	Projecto	Prof. >40m	-	Estrutura flutuante	1MW
Swanturbines	Cygnet	TEH	Protótipo Projecto	ϕ 1m -	-	Base de fundação	300kW 1MW
UEK Corporation	UEK	TEH Ducto x2	Comercial	ϕ 2.4m	2.5m/s	Kite ancorado ao fundo	90kW
Sabella	Sabella D03 Sabella D10	TEH	Protótipo Projecto	ϕ 3m ϕ 10m	-	Base de fundação	500kW
Neptune Renewable Energy	Neptune Proteus NP1000	TEV FC Venturi	Protótipo	Entrada da estrutura 6x6m ²	2.5m/s	Estrutura flutuante	-
Lucid Energy Technologies	Gorlov Helical Turbine	TEV Helicoidal	Comercial	1x2.5m ² 2x2.5m ² 2x5m ²	4.5 m/s (máxima)	Estruturas versáteis	30 kW 59 kW 117 kW
Ocean Renewable Power Company	TidGen Power System	TEH FC Helicoidal	Comercial	11x2 a 30x5m ² Prof. >15m	3 m/s	Estruturas versáteis	250 kW
Blue Energy	Davis Hydro Turbine	TEV	Comercial	-	1.75 m/s	Estruturas modulares	125 kW
Ponti Di Archimede Inter.	Kobold	TEV	Protótipo	6x5m ²	3,5 m/s	Estrutura flutuante	160 kW

Quadro 3.1 – Resumo das características dos equipamentos analisados (continuação).

Empresa / Organização	Nome da Tecnologia	Tipo de turbina	Estado de Desenvolvimento	Dimensões	Velocidade	Sistema de Ancoragem	Potência por unidade
Tidal Energy Pty Ltd	Davidson-Hill Venturi Turbine	TEV Venturi	Gama Comercial	2.25m ² a 100m ² de abertura	1m/s a 6m/s	Mono Pilar	0.77 kW a 7MW
BioPower Systems Pty Ltd	bioSTREAM	Lamina Oscilatória	Projecto	-	-	Mono Pilar	250 kW
Pulse Tidal	Pulse	Lamina Oscilatória	Protótipo Projecto	-	-	Mono Pilar Base gravítica	100kW 1MW
Robert Gordon University	Sea Snail	Lamina Oscilatória	Protótipo Projecto	15x12m ² Prof. <25m	-	Estrutura auto submergível	150 kW 750 kW
The Engineering Business Ltd	Stringray		Protótipo (suspensão)	15x24m ²	3m/s	Base gravítica	150 kW
Vortex Hydro Energy	VIVACE	"Vórtices"	Protótipo	-	1m/s	-	2kW /m ² (3m/s)
C-Energy	-	TEV	Protótipo	25m ²	2m/s	Estaca pilar	30kW
Minesto	Deep Green	TEH Ducto	Protótipo	φ 12m Prof. >60m	1.6m/s	Kite ancorado ao fundo	0.5 MW
University of Strathclyde	CoRMaT	TEH	Protótipo	Prof. >40m	-	Kite ancorado ao fundo	-
Tidal Stream	Triton	TEH x6	Protótipo	Prof. >60m	8m/s	Estrutura flutuante ancorada ao fundo	10MW
Hydro Green Energy	-	TEH Ducto	Projecto	φ 3.6m	3.5m/s	Estrutura flutuante	98 kW
Fri-El Sea Power	-	TEH x20	Projecto	φ 4m x20	2.5m/s	Estrutura flutuante	500kW
Current Power AB	-	TEV	Protótipo	-	-	Base gravítica	5kW
New Energy Corporation Inc	EnCurrent	TEV	Protótipo	φ 7.6m	3m/s	Mono Pilar	250kW
Hidrocínética Engenharia Ltda	-	TEH Ducto	Comercial	φ 1.2m		-	2 kW
PEEHR	Hidroreactor	TEH Ducto	Protótipo	φ 7.6m (9x14m ²)	3m/s	Base gravítica	115kW

TEH – Turbina de Eixo Horizontal

TEV – Turbina de Eixo Vertical

FC – Fluxo Cruzado

Prof. - Profundidade

4

SOFTWARE MOHID

4.1. NOTA INTRODUTÓRIA

O estudo de avaliação do potencial energético das marés no estuário do rio Douro foi realizado recorrendo à modelação matemática do sistema. Actualmente existem vários softwares de modelação utilizados para estudar sistemas hídricos, contudo a maioria é construída para resolução de problemas específicos não existindo interligação entre eles.

Neste capítulo é apresentado o software de modelação hidrodinâmica MOHID, que assenta o seu desenvolvimento em módulos capazes de serem interligados para o estudo de vários ambientes hídricos. Para além do seu avançado estado de desenvolvimento este software é gratuito, sendo um factor determinante para a sua utilização neste trabalho.

4.2. DESCRIÇÃO GERAL DO SOFTWARE

Mohid é a abreviatura de Modelo Hidrodinâmico, nome este que assenta na sua finalidade original quando foi criado em 1985. Devido à sua constante evolução na sequência da aplicação a diferentes projectos, científicos e tecnológicos, actualmente é denominado por *MOHID Water Modelling System*, sendo constituído por mais de 60 módulos correspondentes a cerca de 300000 linhas de código capazes de simular sistemas ambientais complexos.

O sistema *Mohid* é desenvolvido pela MARETEC (*Marine and Environmental Technology Research Center*) no Instituto Superior Técnico (IST), recorre a programação orientada por objectos, utilizando o ANSI Fortran 95. A divisão do sistema é feita em módulos, podendo cada módulo ser entendido com um modelo, sendo no entanto o sistema composto por um único programa executável. A utilização do *ANSI Fortran 95* garante a independência do sistema *Mohid* face ao sistema operativo no qual se pretende executar o modelo e uma fácil implementação do código.

De forma a converter a programação de sistemas num modelo numérico, a análise dos processos é compartimentada conforme o ambiente em que ocorre. Esta abordagem criou a estrutura actual do sistema dividido em grupos funcionais de módulos hierarquizados construídos em cima de uma ou mais bibliotecas de base. Esta estrutura hierárquica de interacção está patente na Figura 4.1, [93].

Desta forma existem actualmente quatro ferramentas principais do programa:

- *MOHID Water* - modelo numérico para simular volumes de água superficial;
- *MOHID Land* – modelo numérico para simulação de bacias hidrográficas;
- *MOHID River Network* – modelo numérico para simulação de aquíferos e redes hidrográficas;
- *MOHID Soil* – modelo numérico que simula o fluxo de água através de meios porosos.

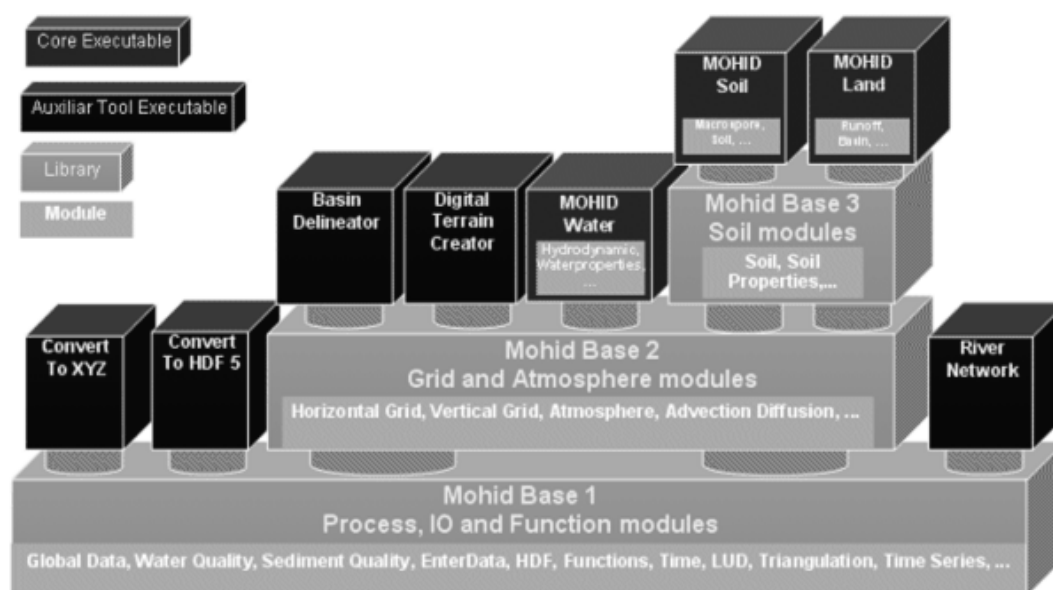


Fig. 4.1 - Concepção hierárquica de interação do sistema MOHID, [93].

4.3. MOHID WATER

Neste contexto interessa perceber o funcionamento do *MOHID Water*, este permite a simulação das principais características físicas, químicas e processos biológicos que ocorrem no ambiente marinho. Para simular cada propriedade o modelo é baseado no conceito de volumes finitos, onde as equações são aplicadas macroscopicamente, em cada volume da célula da grelha, com fluxo divergente, que assegura a conservação no transporte de propriedades.

Este modelo principal interage com outros mais específicos de forma a analisar processos em diversas áreas científicas, como a hidrodinâmica, agitação provocada pela ondulação, transporte de sedimentos, qualidade da água, derramamentos de petróleo, descargas de emissários ou de outros fluxos. Neste sentido serão explorados os módulos do programa que se enquadram no âmbito deste trabalho, utilizadas as ferramentas de apoio à construção do modelo e apresentadas ainda algumas considerações relacionadas com o modelo desenvolvido.

A base de partida para o desenvolvimento deste sistema de modelação foram os modelos sectoriais, entre os quais se destacam três modelos hidrodinâmicos (um modelo bidimensional, um modelo tridimensional com coordenada vertical tipo dupla sigma e um tridimensional com coordenada vertical genérica), um modelo de turbulência unidimensional, um modelo de transporte eulereano, um modelo de transporte lagrangeano e um modelo de qualidade da água.

A possibilidade de correr os vários módulos que compõe o sistema *Mohid* com passos de tempo diferentes, permite obter resultados num reduzido espaço de tempo. Todo o modelo utiliza a alocação dinâmica da memória, tornando-se assim mais versátil, podendo para qualquer tipo de simulação ser sempre utilizado o mesmo executável do programa.

4.3.1. MÓDULO HIDRODINÂMICO

O módulo hidrodinâmico do sistema *Mohid* é capaz de simular o fluxo de massas de água onde a velocidade do fluxo é menor do que a celeridade da onda de pressão. Este módulo foi usado para simular processos hidrodinâmicos no oceano Atlântico, em zonas costeiras (diversas áreas ao longo das costas de Portugal e Brasil), em mais de 30 estuários e sistemas lagunares (na Europa, África e Brasil) e em albufeiras (sul de Portugal). O módulo hidrodinâmico é uma ferramenta numérica orientada para ajudar à compreensão dos processos biogeoquímicos e resolver os problemas ecológicos associados com a actividade humana.

O módulo hidrodinâmico do sistema *Mohid* resolve as equações primitivas do movimento no espaço tridimensional. A discretização espacial destas equações é feita utilizando uma técnica de volumes finitos a qual permite a utilização de um sistema de coordenadas verticais genérico. A discretização temporal é baseada na utilização de um esquema semi-implícito.

O modelo permite a consideração de condições de fronteira abertas ou fechadas. As condições de fronteira abertas podem ser do tipo nível imposto, radiativas ou um misto das duas.

A versatilidade do módulo hidrodinâmico permite que se proponha esta como a única ferramenta para simular o escoamento de um estuário sujeito à oscilação de maré, [94]. De seguida é apresentada uma descrição do modelo incluindo as equações resolvidas (equações 4.1. a 4.4.), o fecho turbulento, as condições de fronteira aberta e a geometria vertical do modelo.

As equações resolvidas pelo módulo hidrodinâmico têm por base o balanço da quantidade de movimento nas três direcções espaciais, e da continuidade em coordenadas cartesianas:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} - fv = -\frac{1}{\rho_r} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(A_H \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(A_H \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(A_V \frac{\partial u}{\partial z} \right) \quad (4.1.)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} + fu = -\frac{1}{\rho_r} \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left(A_H \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(A_H \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(A_V \frac{\partial v}{\partial z} \right) \quad (4.2.)$$

$$\frac{\partial p}{\partial z} + \rho g = 0 \quad (4.3.)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (4.4.)$$

em que t representa o tempo; u, v, w as componentes da velocidade; f o parâmetro de Coriolis; p a pressão; ρ a massa volúmica da água; g a aceleração da gravidade; e A_H e A_V a viscosidade cinemática turbulenta na horizontal e vertical.

As componentes horizontais da velocidade são calculadas com base nas equações do movimento, enquanto que a elevação da superfície livre e a componente vertical da velocidade são calculadas pela equação da continuidade. As equações são aplicadas, explicitamente, a cada volume de controlo num referencial tridimensional, [95].

4.3.2. MÓDULO DAS PROPRIEDADES DA ÁGUA

Este módulo é responsável pela simulação da evolução das propriedades da água, utilizando uma abordagem eulereana. A evolução das propriedades depende dos transportes advectivo e difusivo, das condições de fronteira e das fontes e sumidouros do módulo da qualidade de água. Este módulo utiliza a informação dos seguintes módulos para simular a evolução das propriedades de água:

- módulo *Hydrodynamic*, para obter os fluxos entre as células;
- módulo *Turbulence*, para obter as viscosidades e difusividades;
- módulo *Surface*, para obter os fluxos entre a atmosfera e a coluna de água;
- módulo *Bottom*, para obter os fluxos entre o fundo e a coluna de água;
- módulo *AdvectionDiffusion*, para resolver o transporte das propriedades;
- módulo *WaterQuality*, para calcular as fontes e os sumidouros;
- módulo *Geometry*, para definir a malha de cálculo.

Este módulo é muito adequado para simular ecossistemas aquáticos na sua forma integral, permitindo ao utilizador obter informações sobre a variação espacial e temporal das variáveis em estudo. Do ponto de vista numérico, este módulo é aplicável em estudos em que as propriedades apresentam gradientes baixos, [96].

4.3.3. MÓDULO LAGRANGEANO

O módulo lagrangeano simula o deslocamento de massas de água, traçadores, e a evolução das propriedades da água a eles associadas, de forma semelhante ao módulo das propriedades de água, com a diferença que este módulo recorre a uma abordagem lagrangeana. Este tipo de abordagem é o mais adequado para simular casos em que as propriedades apresentam elevados gradientes, devido às suas propriedades numéricas, [96].

4.3.4. MÓDULO DE TURBULÊNCIA

O módulo de turbulência implementado no modelo *Mohid* fornece aos outros módulos a informação sobre a energia cinética turbulenta, o comprimento de mistura, as viscosidades horizontais e verticais, assim como as difusividades. O sistema *Mohid* inclui modelos empíricos, de comprimento de mistura e modelos que resolvem as equações para a energia cinética turbulenta e para o comprimento de mistura. Estes últimos são utilizados na generalidade dos escoamentos turbulentos, [96].

4.4. FERRAMENTAS E CONSIDERAÇÕES AUXILIARES

4.4.1. MALHA COMPUTACIONAL

No grupo dos módulos relacionadas com a malha computacional incorporam-se os módulos encarregues de tratar a informação batimétrica e topográfica de base incluindo o módulo da geometria vertical. A geometria vertical é dividida em volumes finitos, permitindo ao utilizador escolher a coordenada vertical mais adequada para o estudo em causa.

Destacam-se a coordenada vertical Sigma para escoamentos baroclínicos (por exemplo em estuários pouco profundos), a coordenada vertical Cartesiana para escoamentos caracterizados por colunas de águas estratificadas (caso dos oceanos), a coordenada vertical Harmónica para sistemas estratificados com um grande variação do nível da água (albufeiras). Em relação à malha horizontal, é de salientar que o modelo Mohid suporta fronteiras móveis. Este conceito foi originalmente implementado no modelo para simular as zonas entre marés dos estuários. Nas albufeiras, este conceito também é fundamental devido às variações do nível da superfície livre que induzem grandes variações da área horizontal inundada. No modelo foi definido um parâmetro que indica, a partir de que altura da água, uma célula deve ser considerada descoberta. Quando um ponto tiver uma altura de água inferior a este parâmetro, todos os processos simulados neste ponto são “congelados”.

Esta versatilidade permite subdividir o domínio tanto na horizontal como na vertical, em zonas com diferentes discretizações.

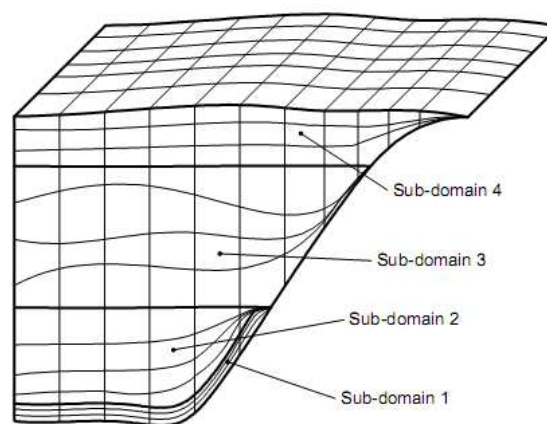


Fig. 4.2 – Malha ilustrativa das propriedades de discretização vertical do sistema Mohid, [94].

4.4.2. CONDIÇÕES DE FRONTEIRA

As fronteiras podem ser consideradas abertas ou fechadas segundo as condições impostas. As fronteiras fechadas podem-se dividir em fixas e móveis. As primeiras são utilizadas para definir a linha de Costa, enquanto as segundas são extremamente úteis para identificar os processos de maré referentes à alteração do nível de água. As fronteiras abertas são usualmente utilizadas para definir a interação do módulo hidrodinâmico com outras massas de água. Podem ser divididas em dois tipos: passivas e activas. Estas últimas são conhecidas à priori, isto é, são impostas e não calculadas pelo modelo. Um exemplo deste tipo de fronteira é a imposição de uma curva de maré para simular a hidrodinâmica de um estuário ou a imposição da vazão de um rio. As condições de fronteira passivas dependem da solução interna e têm como principal objectivo deixar sair perturbações geradas dentro do domínio. As fronteiras radiativas são um exemplo deste tipo de condição de fronteira, sendo utilizadas em diversos tipos de aplicação: ondas de vento, escoamentos oceânicos e costeiros, [94].

O modelo *Mohid* contém quatro módulos que simplificam a imposição das condições de fronteira ao modelo. O módulo *OpenBoundary* fornece as condições do modelo na fronteira aberta. O módulo *Discharges* é responsável pela entrada e saída de massas de água por processos não determinados pela solução no interior do domínio de cálculo (descargas de rios, descargas de efluentes ou caudais turbinados em barragens). A estas massas de água podem ser associadas propriedades transportadas pela água (concentrações ou temperaturas). O módulo *Surface* fornece ao modelo fluxos através da

superfície livre (quantidade de movimento, calor, fluxos de água, oxigénio). O módulo *Bottom* fornece ao modelo fluxos através do fundo, de modo semelhante ao módulo *Surface*.

4.4.3. INTERFACE GRÁFICA

Em paralelo com a aplicação do modelo *Mohid* existe uma interface gráfica em ambiente Windows que permite ao utilizador do modelo gerir os dados de entrada do modelo, executar o programa e analisar os resultados produzidos. No que respeita ao fornecimento de dados, este tipo de interface é importante, pois permite ao utilizador processar com facilidade a informação que é necessário fornecer ao modelo. Esta informação varia desde a escolha de simples parâmetros até informação obtida através de sistemas de aquisição de dados.

Os principais interfaces gráficos com o utilizador são:

- *MOHID GUI* – interface gráfica para manipular a estrutura de organização de arquivos necessários para criar uma simulação numérica;
- *MOHID GIS* – é um sistema de informação geográfica, que lida com variáveis espaciais e temporais;
- *MOHID Post* – interface gráfica que exhibe como animação os dados armazenados em arquivos *HDF*;
- *MOHID Time Series Editor* – interface gráfica que permite visualizar de uma maneira rápida os dados das séries temporais exigidos ou produzidos pelo programa.

A disponibilização deste tipo de interfaces para análise dos resultados assume uma importância fundamental no que respeita à utilização destas tecnologias para a gestão de recursos hídricos, pois permite ao utilizador perceber as variações temporais e espaciais de uma dada propriedade de uma forma fácil e intuitiva.

O início de um projecto é estruturado no *MOHID GIS* de forma a criar um ficheiro com a batimetria assimilada pelo programa, denominado “*Digital Terrain*”. Até este ponto é necessário conjugar uma série de ficheiros de diferentes tipos, dos quais se pode destacar: pontos *XYZ* da batimetria, grelhas de definição das células de cálculo, rede de drenagem, series temporais e domínio de cálculo, [97].

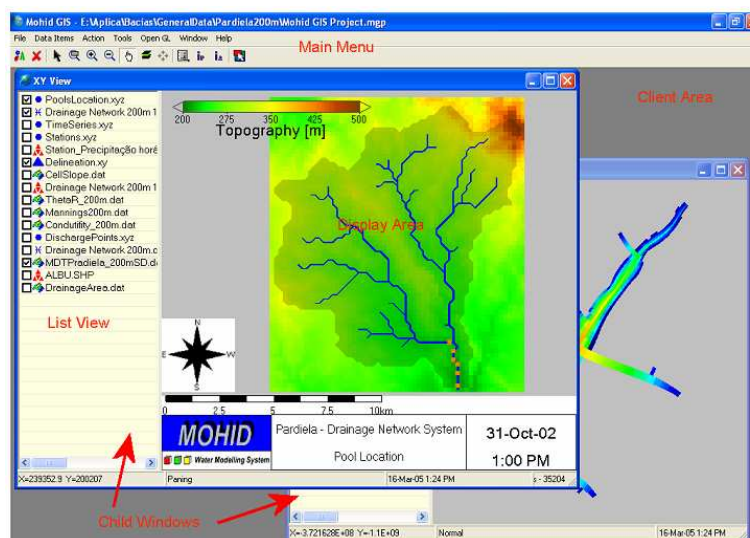


Fig. 4.3 – Vista da janela principal o MOHID GIS, [97].

Após a construção do modelo geográfico o *MOHID GUI* é o interface capaz de compilar de uma forma interactiva toda a informação de caracterização do modelo, como por exemplo: batimetria, marés, descargas, series temporais, qualidade da água, rugosidade, viscosidade e ondulação. Introduzida e reunida toda a informação é determinado o domínio e passo temporal de cálculo, de forma ao modelo ser executado no *Mohid Water*.

Após a execução do modelo é necessário analisar os resultados produzidos. Esses podem ser analisados usando o pós-processador da interface gráfica do modelo *Mohid*. O pós-processador analisa o conteúdo dos ficheiros de resultados e abre uma janela com as estruturas de resultados contidos nesse ficheiro. A partir dos resultados obtidos, o utilizador tem a hipótese de seleccionar a informação que pretende visualizar. O pós-processador do modelo *Mohid* tem a capacidade de produzir vários tipos de figuras a partir dos resultados, nomeadamente campos de cores, isolinhas, vectores e traçadores lagrangeanos. O utilizador pode ainda visualizar os resultados passo a passo ou sob a forma de animações contínuas.

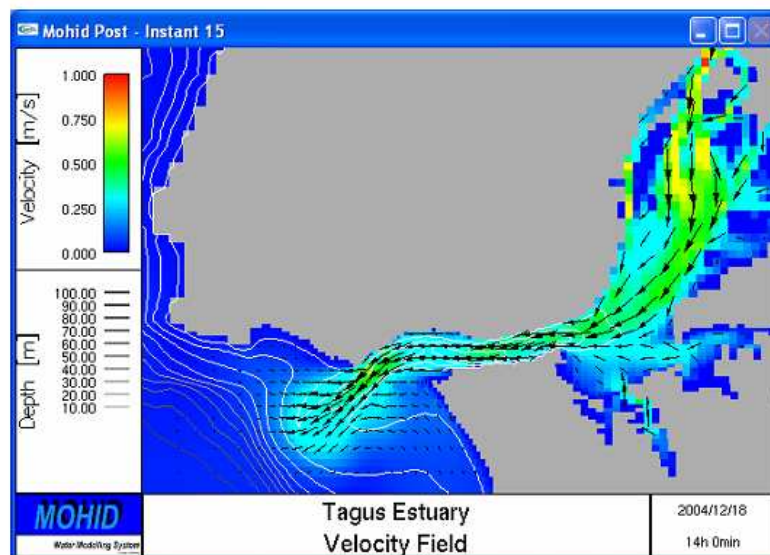


Fig. 4.3 – Janela *OpenGL* editada no pós-processador, [97].

5

CASO DE ESTUDO:
O ESTUÁRIO DO RIO DOURO

5.1. ESTUÁRIO DO DOURO

5.1.1. CARACTERIZAÇÃO GERAL DO ESTUÁRIO DO DOURO

O Rio Douro drena a maior bacia hidrográfica da Península Ibérica. Os 97 600 km² de bacia cobrem cerca de 17 % da Península, dos quais 20 % em Portugal e 80 % em Espanha. O rio desagua no Oceano Atlântico a 41° 08' N; 08° 42' W, entre as cidades do Porto e Vila Nova de Gaia.

Na bacia do Rio Douro existem mais de 50 grandes aproveitamentos hidroelétricos dispostos ao longo do seu curso principal e afluentes, o último dos quais situa-se a 21,6 km da barra (aproveitamento de Crestuma-Lever), tendo entrado em funcionamento em 1985, [98].

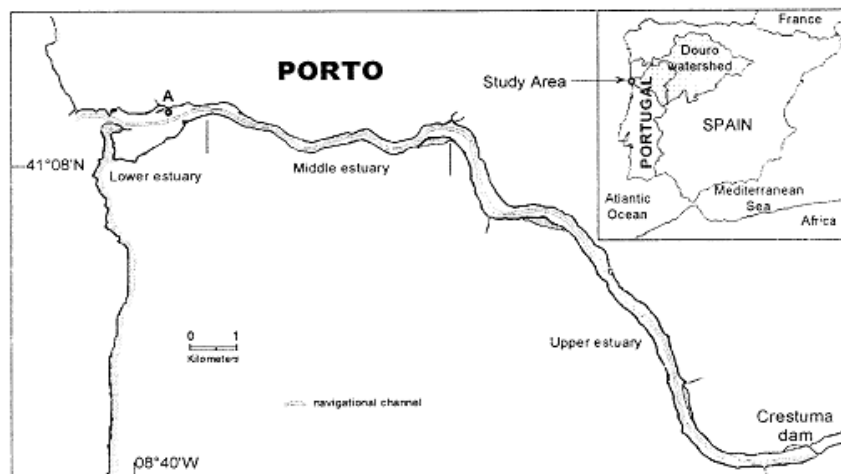


Fig.5.1 – Localização e representação do Estuário do Douro, [99].

O estuário situa-se entre a barra e a barragem de Crestuma-Lever, onde o rio corre num vale relativamente encaixado. A sua largura mínima é de 135m na ponte D. Luiz I (a 6 km da embocadura). A jusante da ponte da Arrábida (2.9 km da embocadura), o estuário alarga atingindo a largura máxima de 1300m. Na embocadura, o banco de areia do Cabedelo disposto perpendicularmente ao eixo do estuário, confina o escoamento ao canal estreito junto à margem norte. O Cabedelo é um banco arenoso cuja forma é modulada pelo regime de agitação e pelo escoamento devido ao rio e à maré. Em

situações de cheia, para caudais da ordem dos 10 000 m³/s o banco é galgado e destruído pelo escoamento, sendo reconstruído progressivamente depois de terminada a cheia. A cota da parte central do Cabedelo é da ordem dos 5 m acima do nível médio da água do mar, [100], ou seja +7.0m ZH.

Na embocadura encontram-se os molhes do Douro, inaugurados em 2009 com o objectivo de melhorar as condições de segurança das embarcações na entrada do canal da barra, proteger as zonas marginais da acção destrutiva das ondas e correntes, e facilitar a auto-limpeza do canal, diminuindo o esforço das dragagens de manutenção. Assim a jusante do Cabedelo encontra-se o Quebramar Sul destacado da margem, que tem como função estabilizar a sua configuração, mantendo-o com uma imagem naturalizada.

A zona em estudo divide-se em três partes: o estuário inferior, que se estende por 3 km a partir da embocadura, correspondendo à zona de expansão máxima da cunha salina durante o Inverno (até à ponte da Arrábida); o estuário médio, que é limitado a montante pela intrusão salina durante o Verão (cerca 8 km, nas proximidades da secção da ponte do Freixo); e o estuário superior, que compreende o restante percurso até à barragem, [99].

O estuário tem uma profundidade média de 8.2m, possui um canal de navegação com 60m de largura e uma profundidade de 4.0m em relação ao ZH, mantido à custa de sucessivas dragagens. As marés, com características mesotidais (altura de 2 a 4m) são semi-diurnas, espaçadas sensivelmente 6 horas. O caudal médio diário afluente ao estuário calculado entre 1986 e 2009 é de 476 m³/s, [101].

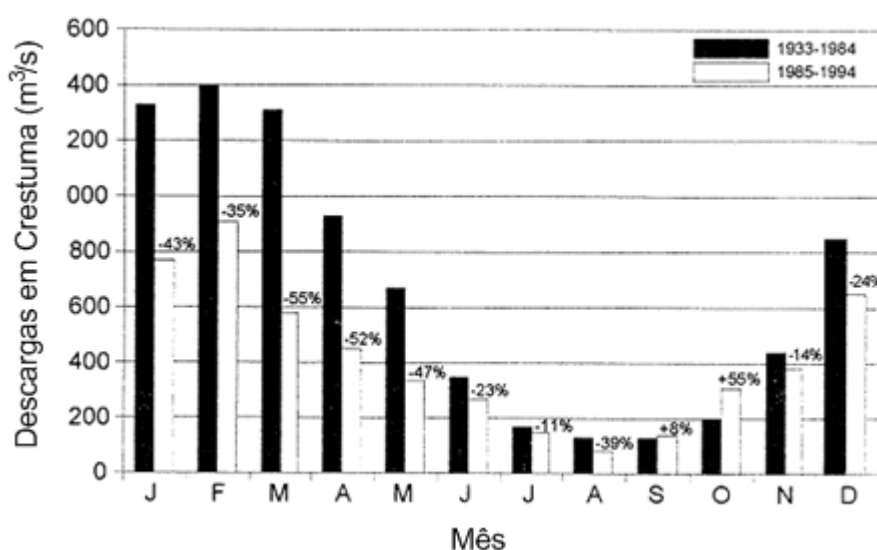


Fig.5.2 – Descargas mensais médias diárias no estuário do Douro referentes aos períodos de 1933-1984 e 1985 e 1994, na barragem de Crestuma, [99].

Nas margens do estuário desenvolveram-se três concelhos ribeirinhos Porto, Vila Nova de Gaia e Gondomar, que exercem uma grande pressão antropogénica sobre o ecossistema. Para além de receptor de efluentes tratados e não tratados, o estuário é também utilizado para actividades de lazer como banhos, pesca desportiva e desportos náuticos e fins comerciais relacionados com a pesca profissional, navegação fluvial de turismo, extracção de inertes e navegação entre rio e mar de granéis, [98].

5.1.2. MARÉ

Na costa oeste portuguesa as marés são do tipo astronómico e semi-diurnas, com ciclos de maré de 12h25, com propagação de Sul para Norte. As características da maré na foz do Douro são semelhantes às de Leixões, pelo que os parâmetros avaliados em Leixões são igualmente válidos para a zona em estudo. A Tabela 5.1 apresenta, de acordo com o Instituto de Hidráulica e Recursos Hídricos (IHRH) em 1999, os níveis máximos e mínimos referentes às marés de preia-mar e baixa-mar ocorrentes em Portugal, referidas ao Zero Hidrográfico de Leixões.

Quadro 5.1 – Elementos relativos às marés ocorrentes em Portugal (IHRH, 1999)

	Marés	Cotas (m)
Preia-mar	Máxima excepcional	+ 4.04
	Viva média	+ 3.42
	Média	+ 2.96
	Morta mínima	+ 2.00
Baixa-mar	Máxima	+ 2.00
	Média	+ 0.90
	Viva média	+ 0.50
	Viva mínima excepcional	+ 0.20

5.1.3. AGITAÇÃO MARÍTIMA

Ao largo da foz do Douro a ondulação incide predominantemente na direcção NW. A interferência deste fenómeno nos sistemas estuarinos é frequente sobretudo em estuários abertos e situações de tempestade. Em tais casos, a consideração da acção dos ventos na subida dos níveis marítimos torna-se bastante importante.

Contudo, no presente trabalho presume-se que, a agitação marítima e a sobrelevação causada pelo vento no estuário não apresenta uma grande influência nos níveis da água no domínio considerado para análise. Desta forma a inclusão de um módulo para a modelação da agitação marítima será negligenciada.

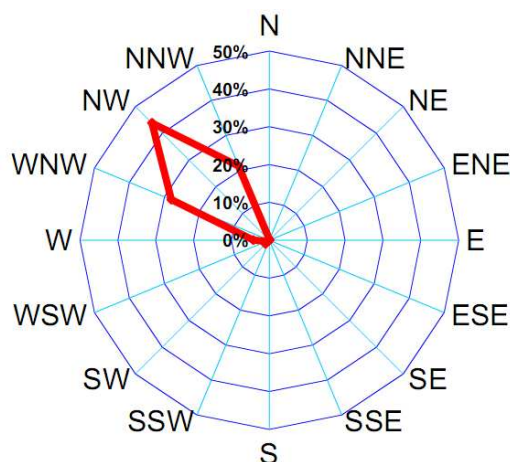


Fig.5.3 – Frequência da direcção das ondas registadas na bóia de Leixões (EUrosion, 2006).

5.2. CONSTRUÇÃO DO MODELO

O modelo desenvolvido para o estudo da hidrodinâmica do estuário do rio Douro foi construído utilizando o *software* MOHID. A estrutura base para a construção do modelo é a apresentada na Figura 5.4.

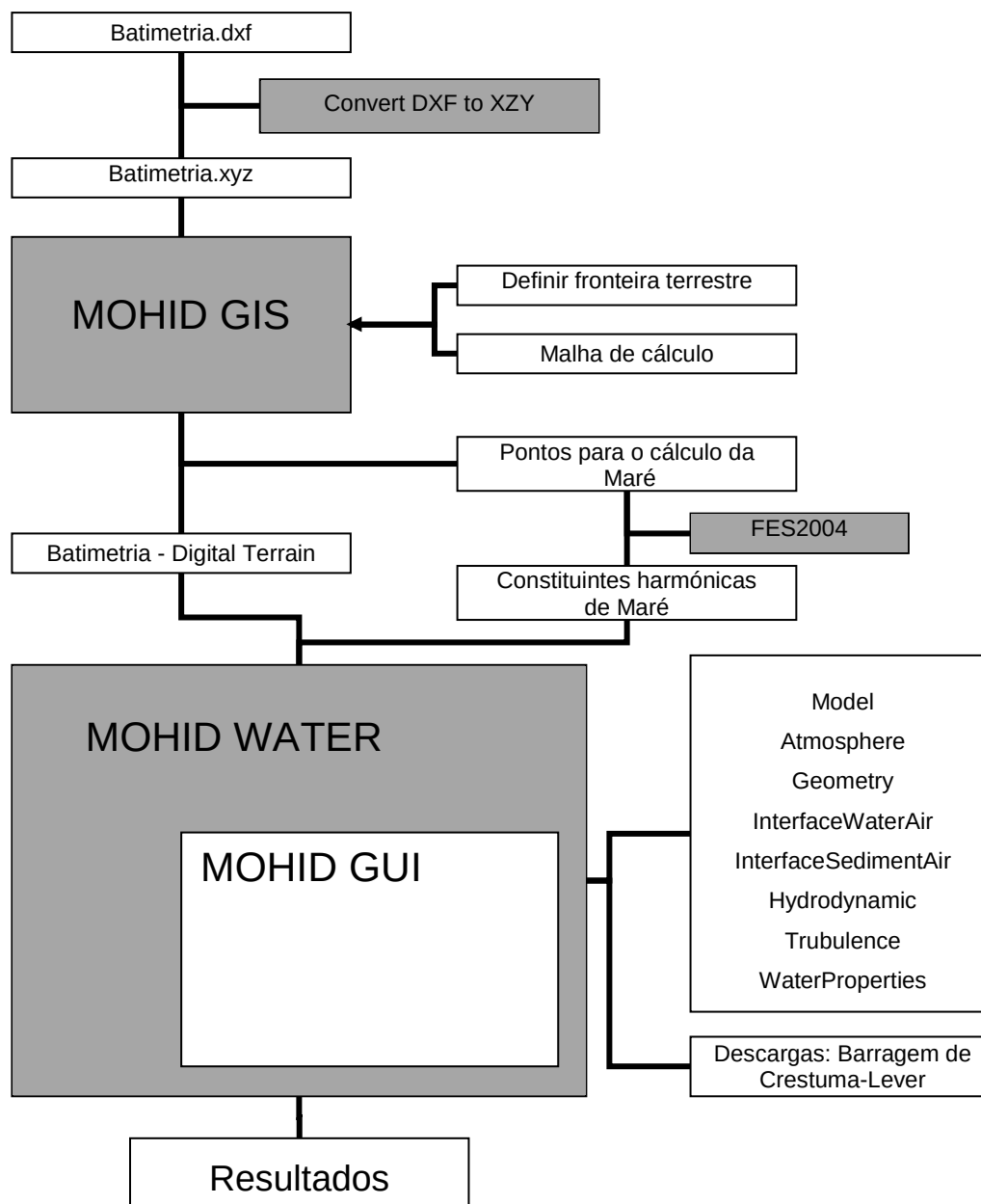


Fig.5.4 – Estrutura utilizada para a construção do modelo, a cinzento encontram-se identificados os *softwares* e módulos do sistema *Mohid* utilizados.

5.2.1. BATIMETRIA

A batimetria usada na construção do modelo no presente estudo foi definida a partir de uma compilação de dados batimétricos referentes ao ano de 2002, fornecidos pela APDL (Administração dos Portos do Douro e Leixões) em coordenadas cartográficas referentes ao Datum 73.

O levantamento encontra-se mais detalhado desde a batimétrica dos 30m na plataforma adjacente ao estuário, até à ponte do Freixo. A montante da ponte do Freixo a batimetria foi construída por interpolação das secções transversais tendo em consideração o desnível até à Barragem de Crestuma, nesse intervalo foi também modelado um canal de navegação à cota -4.0m ZH.

A delimitação do estuário foi realizada através de cartas militares à escala 1:25000 (serie M888, do Instituto Geográfico do Exército), referenciadas ao Sistema Hayford-Gauss Militar, derivado por uma translação (-200km para leste, 300km para sul) da origem das coordenadas cartográficas do Datum 73, tornando-as todas positivas em território português.

5.2.2. GRELHA

Na modelação do estuário foi utilizada uma grelha rectangular referenciada ao Sistema Hayford-Gauss Militar com origem no ponto [455;147] km, abrangendo um comprimento de 24km na direcção Este e uma extensão de 15km na direcção Norte. A resolução máxima da grelha no interior do estuário é de 50m por 50m, nas zonas oceânicas de fronteira aberta a resolução é de 50m na direcção N-S e de 150m na direcção E-W.

5.2.3. BATIMETRIA MODELADA

A batimetria modela representada na Figura 5.5, foi construída com base nas considerações referidas em 5.2.1 e a grelha de cálculo apresentada em 5.2.2.

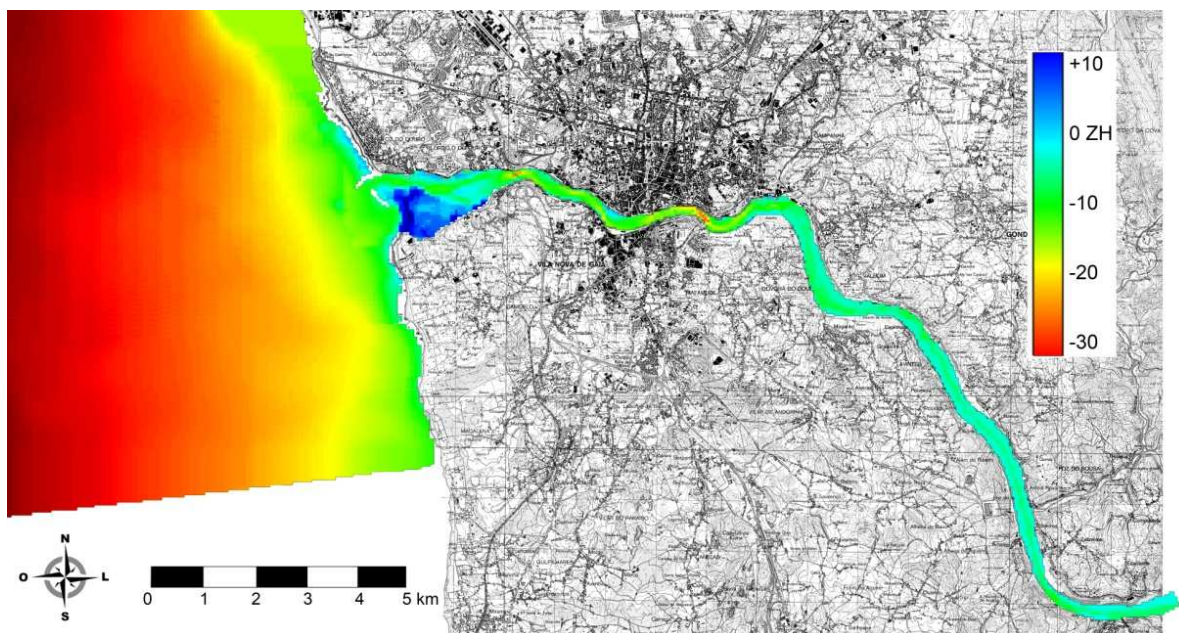


Fig.5.5 – Representação da batimetria modelada.

5.2.4. FORÇAS DE MARÉ

A simulação dos níveis de maré na fronteira aberta ao largo da foz do Douro foi efectuada recorrendo ao programa de cálculo FES2004 (Finite Element Solution) que apresenta uma solução global para os constituintes de maré. Este programa tem como base um modelo hidrodinâmico de elementos finitos de elevada precisão, devido à consideração de um elevado número de constituintes e das correlações efectuadas nos principais constituintes com os resultados adquiridos na missão TOPEX/POSEIDON (missão satélite conjunta entre a NASA e a CNES, Agencia Espacial Francesa, com o objectivo de descrever a topografia da superfície marítima, em 1992), [7].

Desta forma, impondo as coordenadas dos pontos de fronteira e um nível médio do mar adoptado (NMA) de 2.00m, [102], são calculadas 14 componentes harmónicas da maré: M2, S2, K2, N2, 2N2, O1, P1, K1, Q1, Mf, Mtm, Mm, Msqm e M4.

5.2.5. ATRITO DE FUNDO E COEFICIENTE DE DIFUSÃO TURBULENTA

O coeficiente de atrito de fundo é introduzido através da rugosidade de Manning que após a calibração do modelo foi admitido igual a $0.025\text{m}^{-1/3}\text{s}$ e por simplificação considerado constante ao longo do estuário. O coeficiente de difusão turbulenta horizontal foi definido como sendo igual a $20\text{m}^2/\text{s}$.

5.2.6. DOMÍNIO E PASSO TEMPORAL

O modelo compreende a simulação de um ciclo lunar de 29.5 dias para cada cenário de caudais, de forma a simular diferentes estados de maré. No cálculo foi utilizado um passo temporal de 12s, definido em conformidade com o limite imposto pelo número de Courant, [103], equação 4.5.

$$C = \nu \frac{\Delta t}{\Delta x} \quad (5.1.)$$

em que C representa o numero de Courant (adimensional); ν a celeridade da onda gravítica (m/s); Δt o passo de cálculo (segundos); e Δx o comprimento da célula da malha de cálculo (m).

5.2.7. CAUDAL

O caudal foi imposto na fronteira de montante, tendo sido calculados os caudais médios diários mensais a partir dos dados do Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos (SNIRH), utilizando o caudal médio diário efluente da barragem Crestuma-Lever entre 1986 e 2009.

A barragem Crestuma-Lever tem alguma capacidade de armazenamento, funcionando na generalidade a fio de água. Como se pode observar na Figura 5.6 existe uma elevada variação mensal dos caudais efluentes da barragem, contudo alguns destes meses apresentam caudais semelhantes. Assim de forma a simplificar o número de simulações a modelar, foram adoptados quatro cenários de caudal diário médio mensal, agrupando três meses em cada cenário.

No entanto o caudal efluente da barragem de Crestuma depende não só da estação do ano, como das necessidades hidroeléctricas exigidas aos aproveitamentos de toda a bacia hidrográfica, introduzindo assim variações anuais, sazonais, diárias e também horárias, ao regime natural de caudais. Frequentemente, o caudal é interrompido ao longo de vários dias, especialmente em Agosto, ou numa base diária de 8 a 23 horas, seguida de descargas pulsantes da ordem dos 300 a $1300\text{m}^3/\text{s}$. Assim, o

caudal médio diário não reflecte a verdadeira dinâmica do sistema, [104], neste sentido é relevante adoptar uma lei horária do caudal turbinado capaz de caracterizar mais fielmente a realidade do escoamento, influenciado em boa parte pelo caudal efluente de Crestuma. Foram assim consideradas diferentes leis horárias de turbinamento, Figura 5.7, de acordo com o caudal adoptado e a conjecturável produção energética da Barragem de Crestuma. Na lei horária adoptada foram ignorados os caudais ecológicos e caudais referentes à eclusa de navegação por se considerarem de pouca relevância para o sistema em estudo.

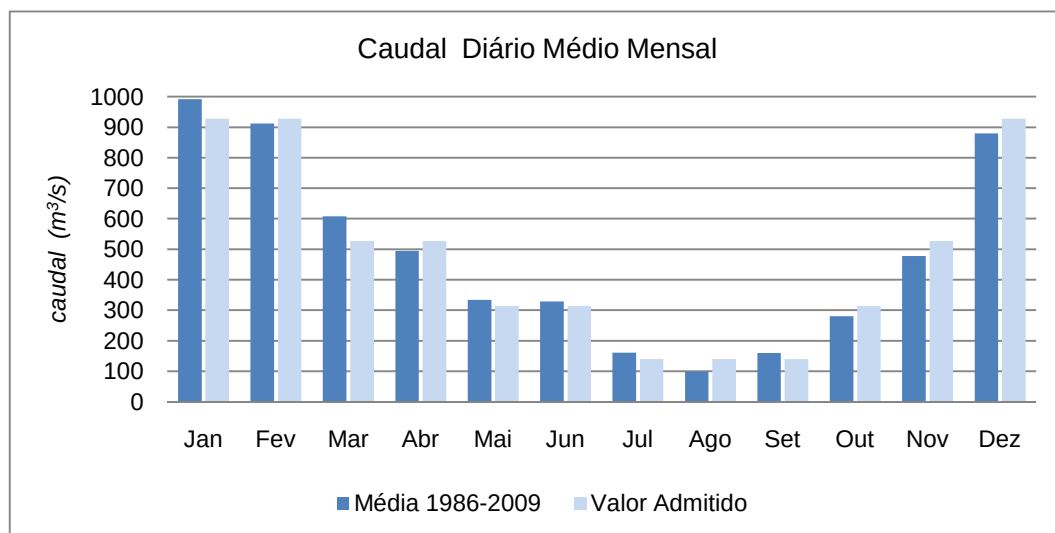


Fig.5.6 – Descargas mensais médias diárias no estuário do rio Douro entre 1986-2009 e valor mensal do caudal diário médio admitido para os cenários de cálculo.

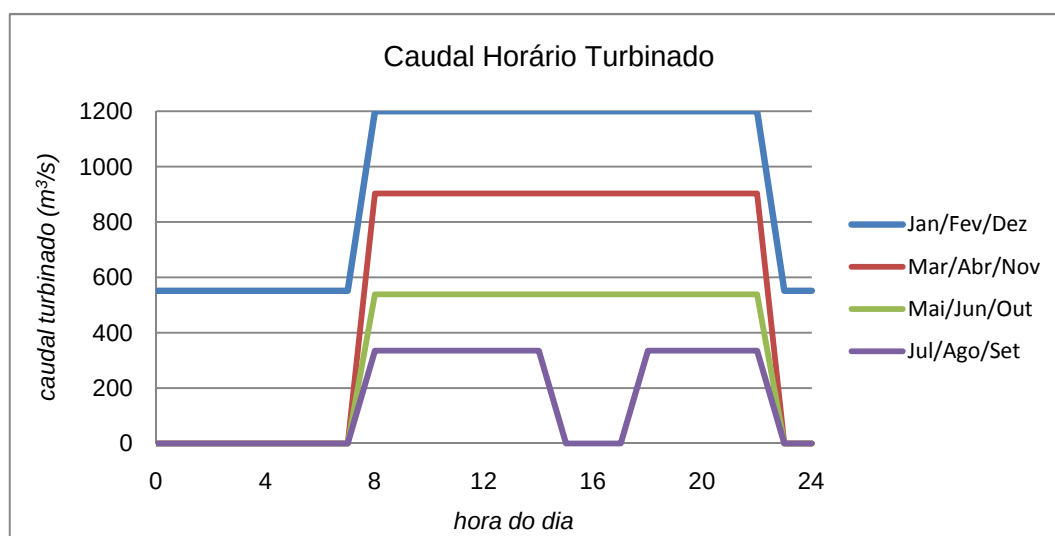


Fig.5.7 – Caudal horário turbinado adoptado para os diferentes períodos do ano.

5.2.8. CENÁRIOS DE CÁLCULO

Tendo em conta as considerações anteriores foram definidos cinco cenários de cálculo, com diferentes caudais descarregados na Barragem de Crestuma que pretendem caracterizar o escoamento do estuário

num ano médio. Cada simulação foi realizada durante um ciclo lunar de 29.5 dias, sendo desta forma, possível caracterizar o escoamento em situação de maré-morta e maré-viva. No Quadro 5.2 são apresentadas as simulações efectuadas e a sua duração anual correspondente, consideradas para a caracterização do escoamento.

Quadro 5.2 – Simulações realizadas durante um ciclo lunar de 29.5 dias e duração anual correspondente.

Simulações	Caudal (m ³ /s)	Tempo (anual)	Horas anuais
S0	0	183 dias . 41.7% + 92 dias . 58.3%	3119
S1	335	92 dias . 41.7%	921
S2	550	92 dias . 58.3% + 90 dias . 41.7%	2188
S3	903	91 dias . 58.3%	1273
S4	1200	90 dias . 58.3%	1259

5.3. CALIBRAÇÃO DO MODELO

O processo de calibração do modelo para validação dos resultados obtidos foi realizado tendo por base de comparação os dados referentes à “Campanha hidromorfológica para estudo da barra do Douro”, desenvolvida pelo Instituto Hidrográfico durante os meses de Setembro e Outubro de 1994, [105]. Foram também utilizados dados referentes aos níveis de maré no Cais dos Banhos e dados de um modelo computacional do estuário implementado com o *software* RMA2 desenvolvido na Universidade do Minho, [106]. No Anexo 3 são apresentadas as localizações dos Cais do estuário do rio Douro referidos na calibração do modelo.

A afinação do modelo e construção de condições de fronteira fidedignas é um processo com uma dinâmica complexa, requerendo um trabalho minucioso de estruturação da batimetria e representação das reais condições de fronteira. Este processo foi em determinada fase realizado com a colaboração do MARETEC, IST, sendo previsto um plano de trabalhos demasiado moroso que não pode ser seguido devido ao prazo limite de conclusão deste trabalho. Assim, com o objectivo de diminuir a instabilidade do modelo, foi introduzida uma fronteira de relaxação das forças de maré imposta pela condição de Blumberg & Kantha, [107], e um arranque lento das forças de maré (12 horas) de forma a estabilizar o modelo. Posteriormente e por não introduzir alterações relevantes no escoamento no estuário, a fronteira aberta oceânica foi limitada à zona Oeste, sendo fechada a fronteira a Norte e Sul.

5.3.1. CAMPANHA HIDROMORFOLÓGICA PARA ESTUDO DA BARRA DO DOURO

Para a calibração foram usados, como foi referido, dados da “Campanha hidromorfológica para estudo da barra do Douro”, realizada em 1994 para validação do modelo. Contudo deve-se ter em conta que o cenário modelado apresenta diferenças relevantes em relação à configuração do estuário em 1994, devidas à construção dos molhes do Douro e alterações decorrentes do transporte sedimentar.

O caudal descarregado da Barragem de Crestuma foi simulado como um caudal constante de 244m³/s, correspondente ao caudal médio dos meses em que decorreu a campanha hidromorfológica de 1994. Nas Figuras 5.8 a 5.10 são apresentados gráficos referentes ao nível da superfície livre da água observados durante a campanha hidromorfológica e modelados, em três pontos distintos: Leixões, Cantareira e Cais da Estiva.

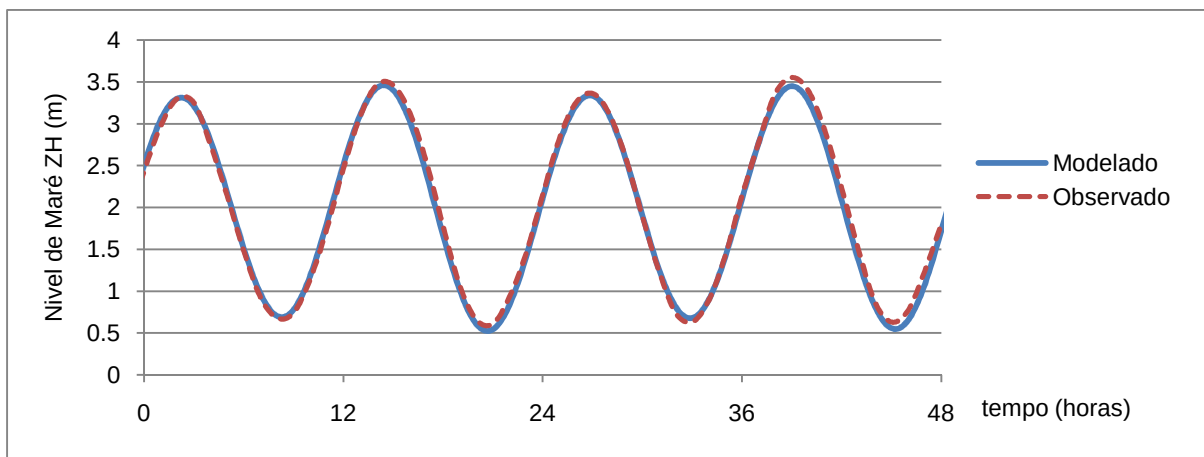


Fig.5.8 – Nível da superfície livre da água referente ao ZH, observado/modelado em Leixões, dias 19 e 20 de Setembro de 1994.

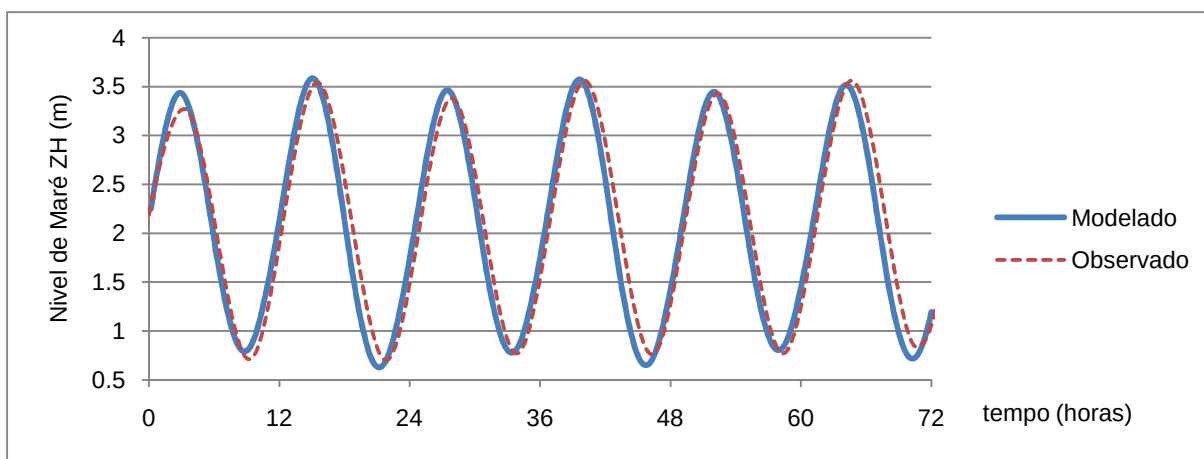


Fig.5.9 – Nível da superfície livre da água referente ao ZH, observado/modelado na Cantareira, dias 19, 20 e 21 de Setembro de 1994.

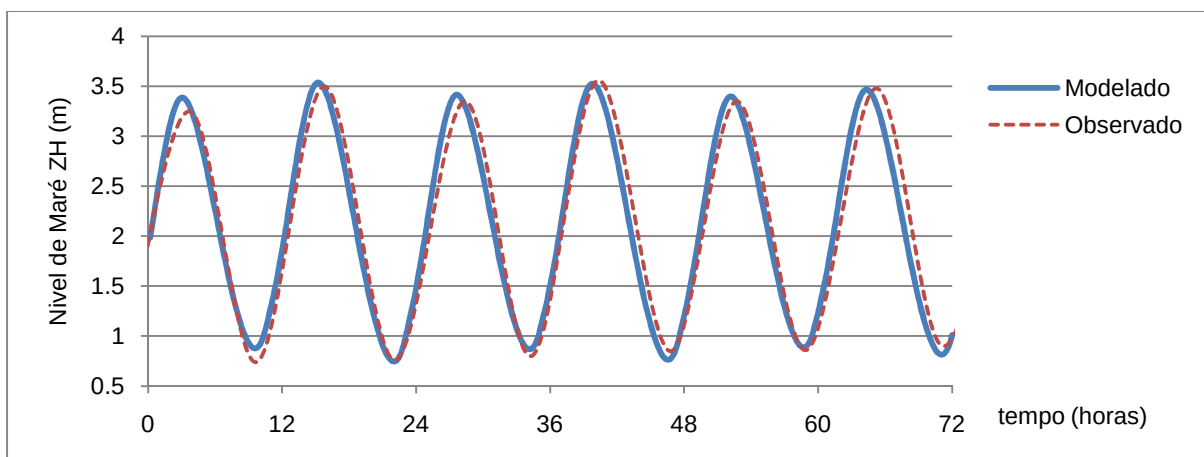


Fig.5.10 – Nível da superfície livre da água referente ao ZH, observado/modelado no Cais da Estiva, dias 19, 20 e 21 de Setembro de 1994.

A validação dos valores relativos às velocidades das correntes, modeladas foi realizada por comparação com os dados recolhidos durante a campanha hidromorfológica. Os valores observados referem-se apenas a duas zonas do estuário inferior, identificadas na Figura 5.11 como A1 e B1. A observação das velocidades foi efectuada à superfície e no fundo, sendo estes valores comparados com a velocidade modelada nas Figuras 5.12 a 5.17. De referir que a velocidade modelada representa a velocidade média da coluna de água. Os valores de intensidade de corrente negativos são indicadores de vazante e os positivos de enchente.

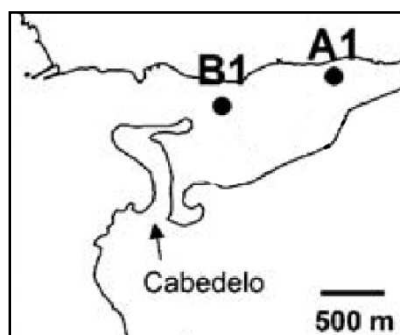


Fig.5.11 – Estações de observação A1 e B1 (adaptado), [108].

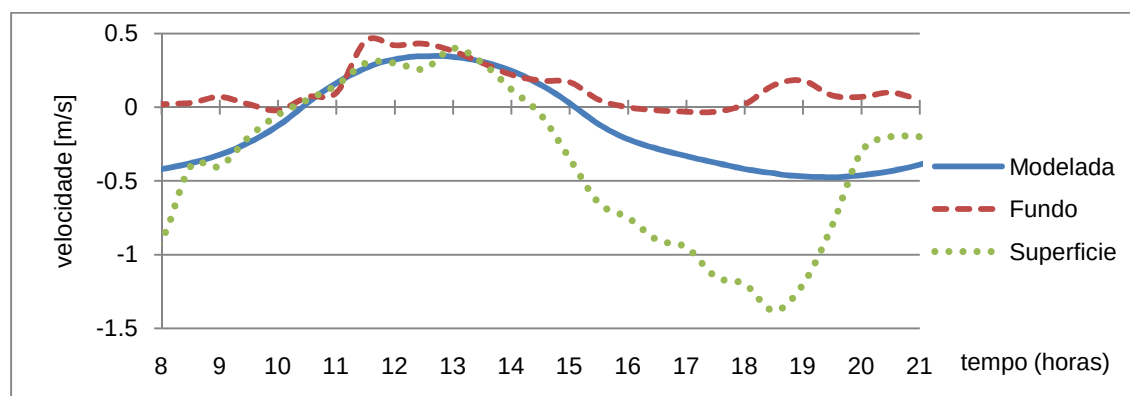


Fig.5.12 – Velocidades da corrente observadas no fundo e à superfície / modelada na estação A1, 19/09/94.

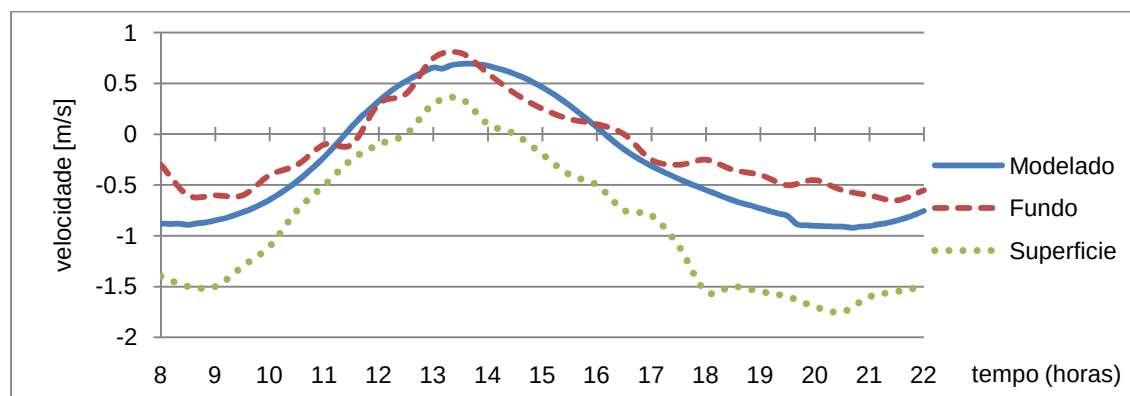


Fig.5.13 – Velocidades da corrente observadas no fundo e à superfície / modelada na estação B1, 21/09/94.

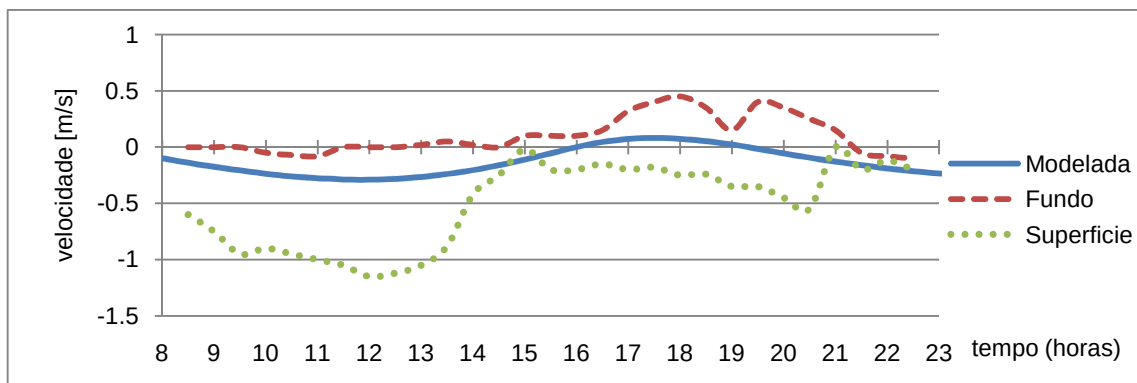


Fig.5.14 – Velocidades da corrente observadas no fundo e à superfície / modelada na estação A1, 27/09/94.

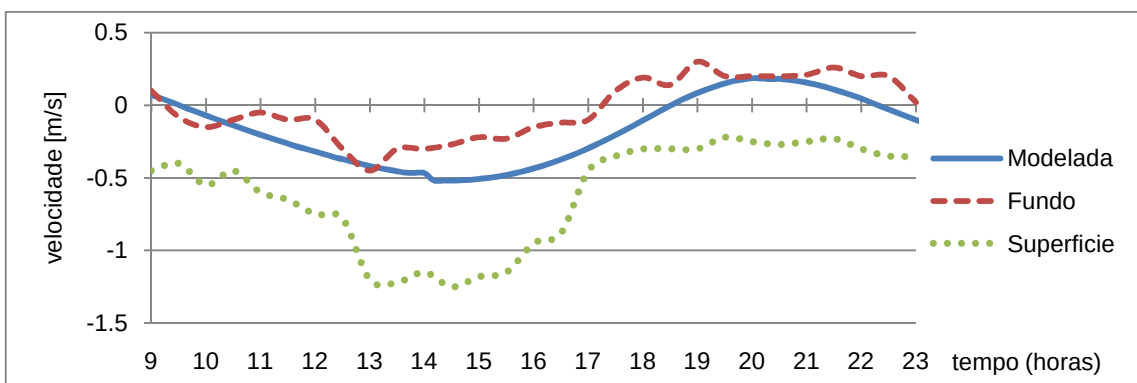


Fig.5.15 – Velocidades da corrente observadas no fundo e à superfície / modelada na estação B1, 29/09/94.

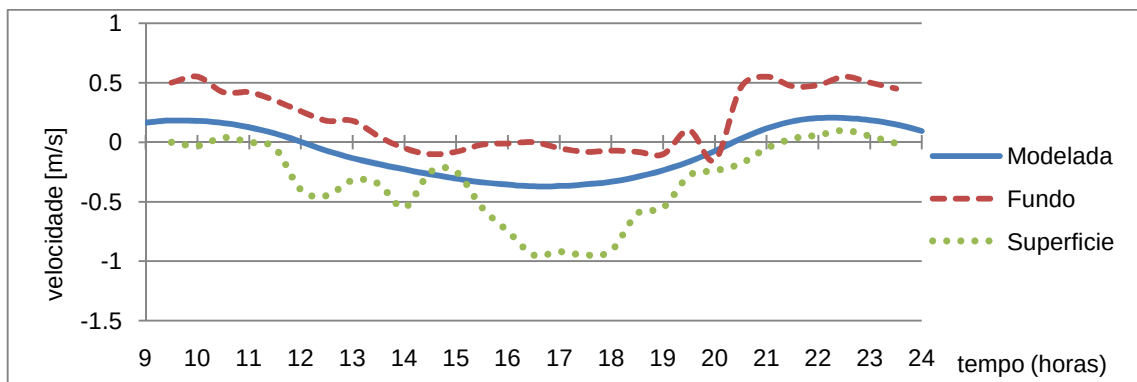


Fig.5.16 – Velocidades da corrente observadas no fundo e à superfície / modelada na estação B1, 1/10/94.

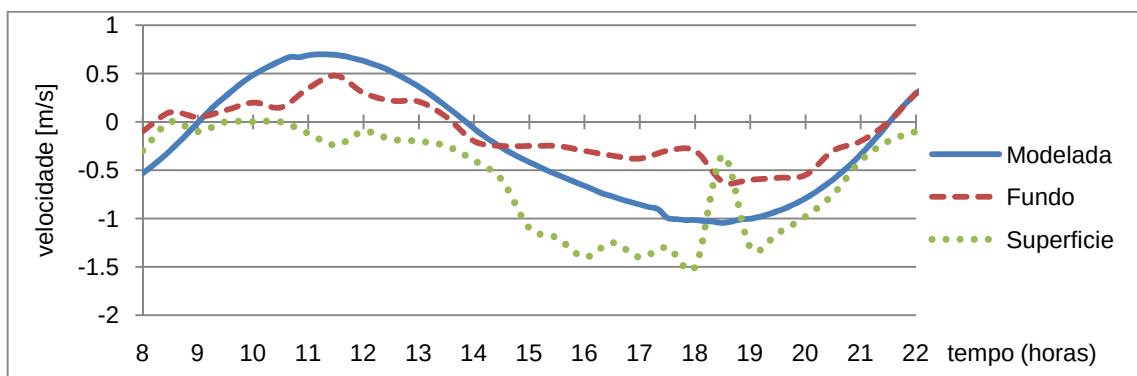


Fig.5.17 – Velocidades da corrente observadas no fundo e à superfície / modelada na estação B1, 3/10/94.

5.3.2. MODELO BIDIMENSIONAL DO ESTUÁRIO, RMA2

Para validação dos resultados obtidos foi também utilizado um modelo hidrodinâmico do estuário do rio Douro desenvolvido na Universidade do Minho para o programa de cálculo bidimensional no plano horizontal RMA2. Na versão do modelo utilizada não se prevê situações de cobre/descobre na restinga e foi construído com uma batimetria linearizada a montante da ponte da Arrábida. Desta forma para viabilizar uma análise comparativa entre os dois modelos, foi construído um modelo simplificado com o programa MOHID utilizando-se a mesma batimetria utilizada na versão do modelo construído com o programa RMA2. A análise e comparação dos resultados obtidos no modelo MOHID foram conseguidos através do programa de pré e pós-processamento SMS (Surface-Water Modeling System) e tiveram como intuito validar os valores admitidos para a rugosidade de Manning e para o coeficiente de difusão turbulenta.

Na análise foram impostas condições de fronteira idênticas nos dois modelos referentes ao nível de maré e ao caudal afluente ao estuário. Foram realizadas simulações de 48h para um cenário de maré viva com um caudal efluente constante na barragem de Crestuma de $500\text{m}^3/\text{s}$. Na Figura 5.18 é apresentada uma representação da intensidade da corrente no estuário nos dois modelos estudados para o mesmo instante temporal.

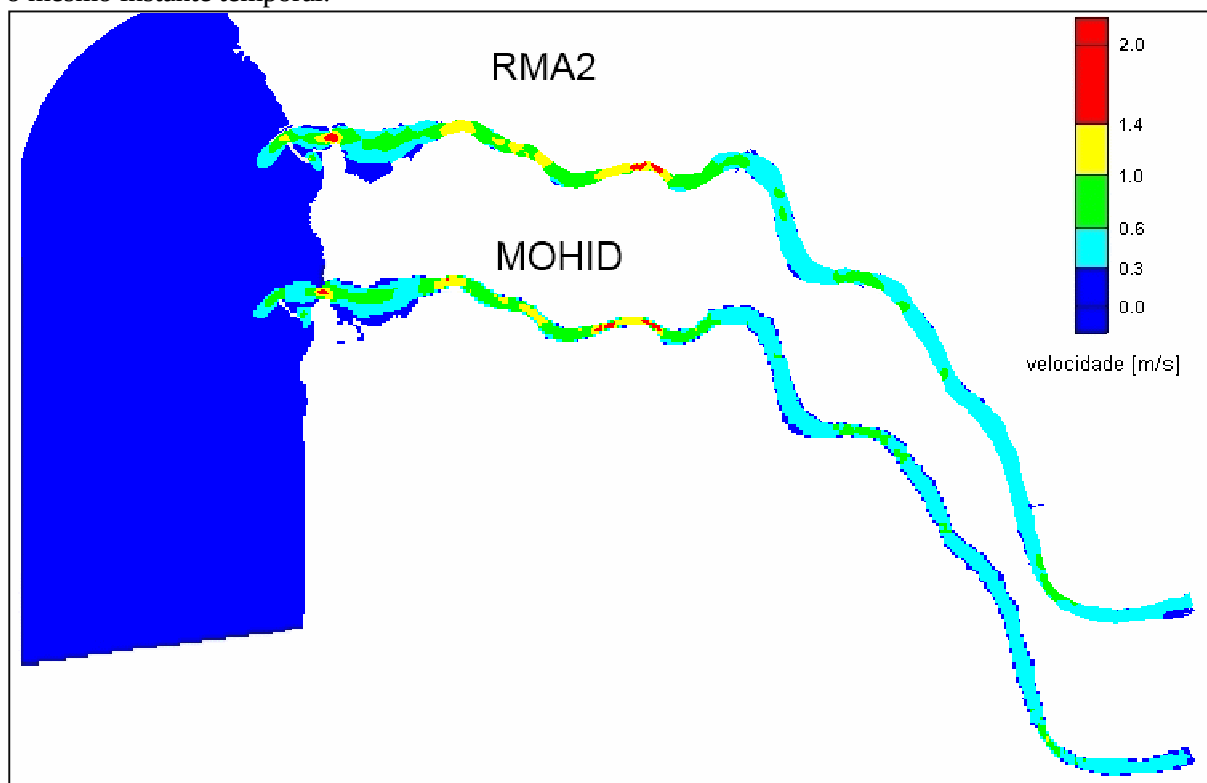
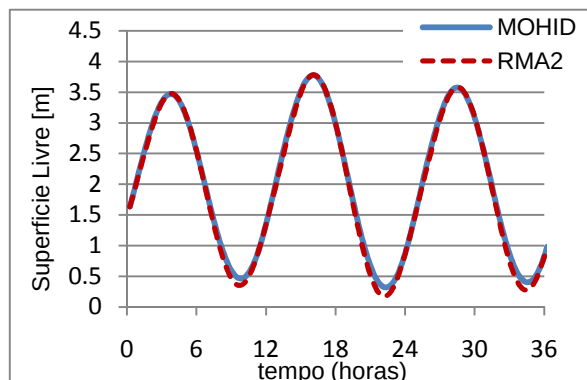
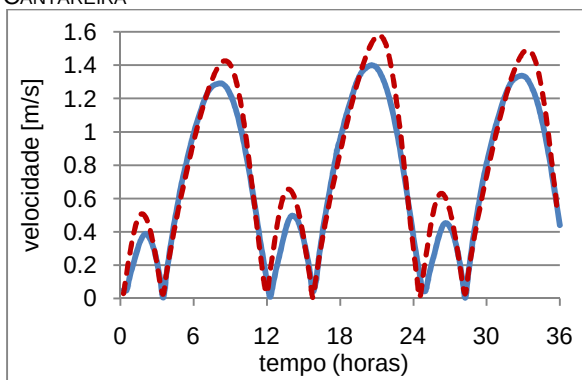


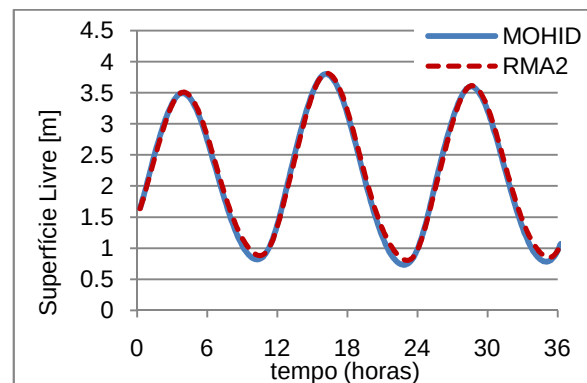
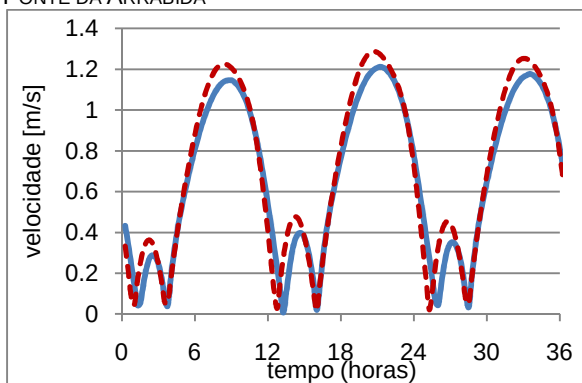
Fig.5.18 – Representação da intensidade da corrente no estuário no modelo RMA2 e no MOHID às 8.00h do dia 31 de Janeiro 2010 com um caudal descarregado constante em Crestuma de $500\text{m}^3/\text{s}$.

Os resultados observados são semelhantes em ambos os modelos, apresentando diferenças pontuais mais significativas nos valores da velocidade da corrente. Este facto poderá estar relacionado com o diferente refinamento da batimetria. No modelo construído no MOHID foi utilizada uma malha constante de $50 \times 50\text{m}$, enquanto que no RMA2 foi aplicada uma malha triangular variável (triângulos com lados entre 190m a 5m), conferindo elevado grau de refinamento na fronteira terrestre. Na Figura 5.19 são expostas comparações do nível da superfície livre e da velocidade do escoamento para diferentes pontos do estuário situados na Cantareira, Ponte da Arrábida, Ponte D. Luiz I e Zebreiros.

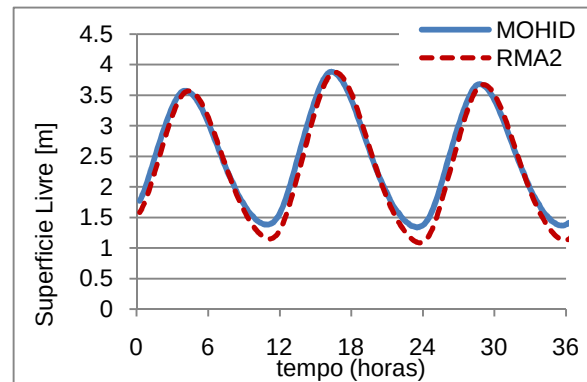
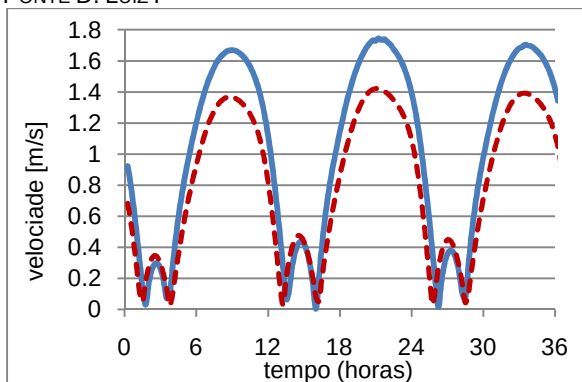
CANTAREIRA



PONTE DA ARRÁBIDA



PONTE D. LUÍZ I



ZEBREIROS

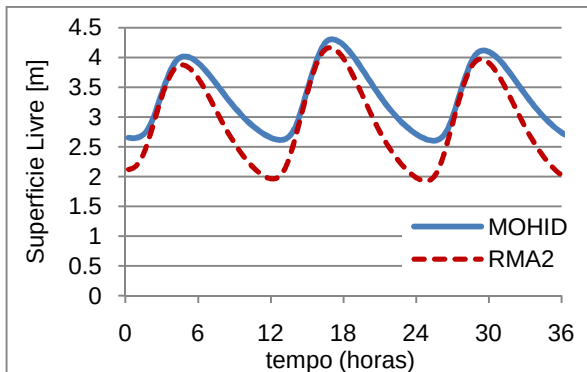
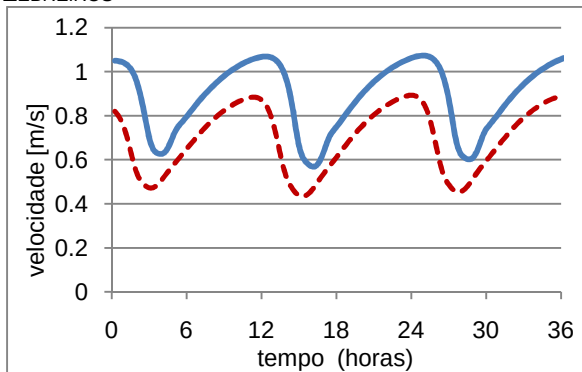


Fig.5.19 – Comparação dos valores modelados da velocidade da corrente e nível da superfície livre no software MOHID e RMA2 para quatro pontos do estuário, dias 30 e 31 de Janeiro 2010.

5.3.3. CAIS DOS BANHOS, SNIRH

Neste ponto foram comparados dados relativos ao nível hidrométrico instantâneo observado no Cais dos Banhos, disponibilizados no SNIRH (Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos) com os valores modelados. Foram considerados dois períodos distintos tendo em conta os caudais descarregados em Crestuma, relativos a um caudal baixo de $37\text{m}^3/\text{s}$ (de 6 a 8 de Agosto de 2009) e um caudal elevado de $1055\text{m}^3/\text{s}$ (de 29 a 31 de Janeiro de 2010).

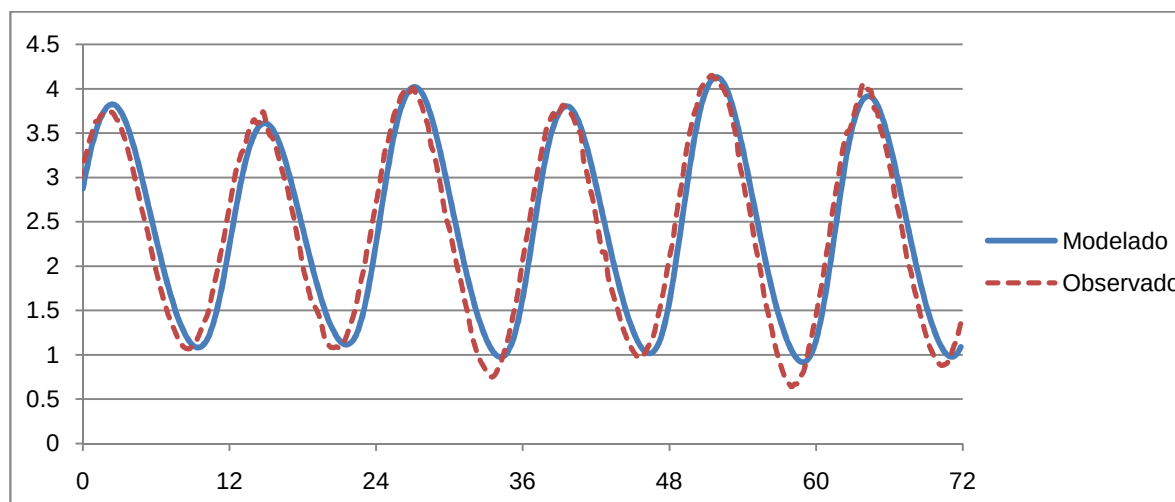


Fig.5.20 – Nível da superfície livre, observado/modelado no Cais dos banhos, dias 29, 30 e 31 de Janeiro, 2010.

5.3.4. JACTO DE SAÍDA DO ESTUÁRIO

A caracterização do jacto de saída do estuário é conseguida de acordo com a hidrodinâmica real do estuário do rio Douro, na qual o jacto de saída no pico da vazante induz dois vórtices, um a norte anticiclónico e outro a sul ciclónico. Estes vórtices facilitam o início da enchente pelas zonas junto a terra, enquanto que a quantidade de movimento transportada pelo jacto de saída dificulta a transição para o escoamento de enchente na zona por ele ocupada. Na zona do jacto o escoamento continua a ser para o largo, porém observa-se que nas zonas adjacentes as correntes se dirigem para a embocadura, [109]. Na Figura 5.21 é possível observar uma representação do jacto de saída modelado.

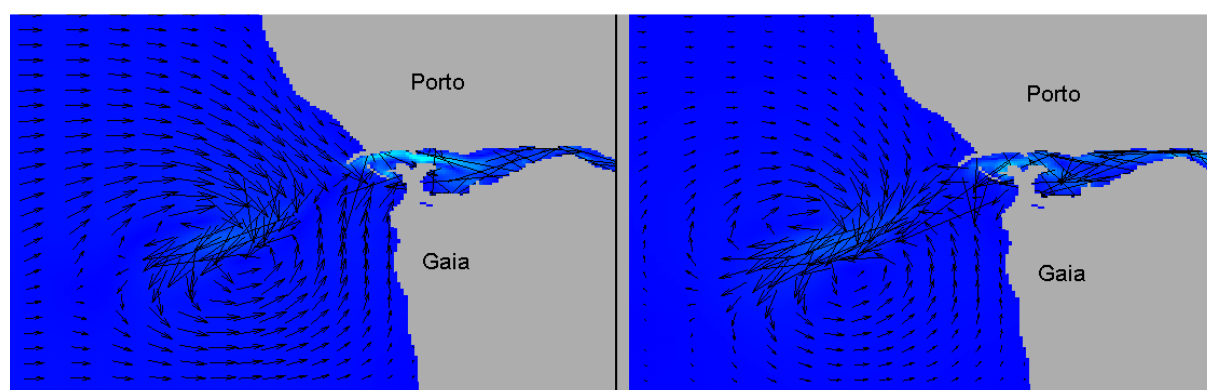


Fig.5.21 – Representação do jacto de saída modelado em duas situações temporais.

5.4. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Os resultados apresentados referem-se aos pontos do estuário com maior potencial. Esta identificação foi realizada através da análise da velocidade das correntes, considerando a velocidade mínima requerida para análise do local igual a 1m/s no pico de vazante de uma maré viva. Como o factor velocidade está elevado ao cubo (Equação 2.1) é evidente que se este for inferior à unidade o potencial de aproveitamento energético será exíguo.

Conforme se observa na Figura 5.18, as zonas de maior potencial localizam-se por ordem decrescente: na embocadura do estuário junto à Cantareira (I), nas secções das pontes D. Luiz I e do Infante (II), na zona adjacente ao edifício da Alfandega do Porto (III) e na zona da Ponte da Arrábida (IV).

A montante da ponte do Freixo os resultados não foram considerados válidos para discussão devido à inexistência de informação relativa à batimetria dessa área e ao aparecimento de velocidades de escoamento não expectáveis. Observa-se que o modelo construído poderá induzir nesta área um aumento da velocidade do escoamento devido à baixa profundidade considerada, sendo insuficiente a introdução do canal de navegação para caracterizar fidedignamente a zona em estudo.

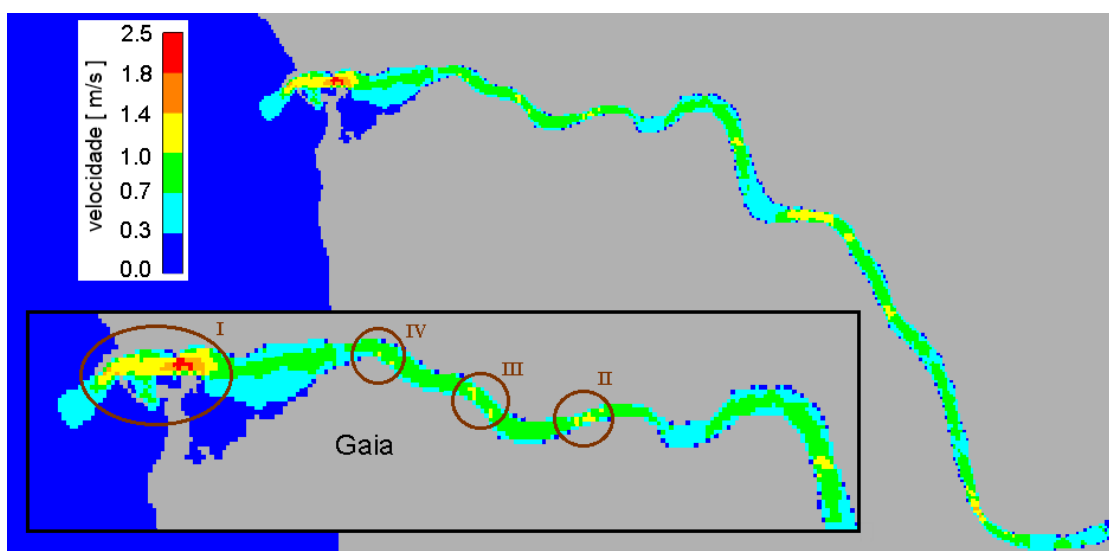


Fig.5.22 – Representação das velocidades de escoamento durante um pico de vazante da maré viva no cenário considerado de caudal máximo.

O estudo foi realizado para os diferentes cenários referidos no Quadro 5.2, durante um período de 29.5 dias. Na Figura 5.23 é apresentada a série de marés modelada em todos os cenários.

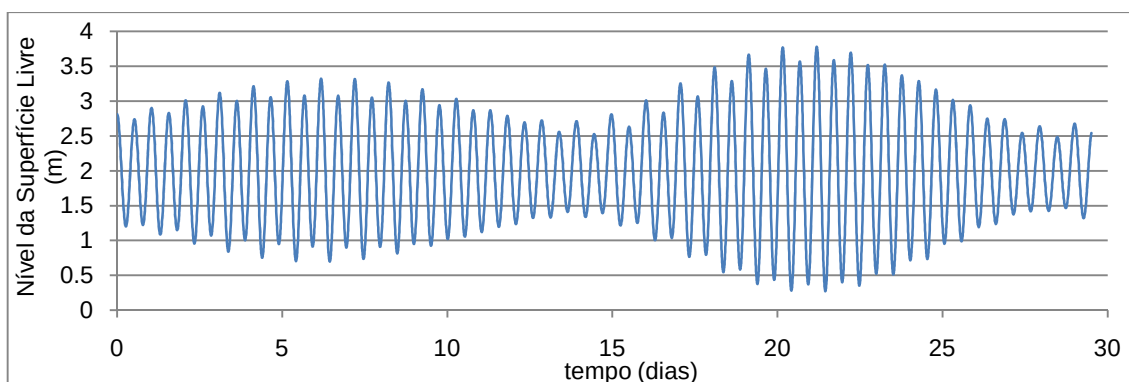


Fig.5.23 – Representação dos níveis de maré simulados durante um período de 29.5 dias.

O cálculo do potencial energético disponível é realizado através da Equação 2.1 tendo por base as velocidades modeladas. O potencial energético recuperável de acordo com a Equação 2.2 e a eficiência adoptada é igual a 33% do disponível. De seguida são apresentados os resultados para as zonas acima referidas, sendo efectuada uma análise mais detalhada para a zona de maior potencial energético.

5.4.1. EMBOCADURA (CANTAREIRA)

A secção da cantareira, como foi referido, é a que apresenta maior potencial energético. A zona de possível instalação de equipamentos de geração de energia, identificada na Figura 5.24, tem a largura de 190m, considerando a instalação de um sistema de uma fiada com uma área útil de geração energética igual a 190m de largura por 5m de altura, anualmente e de acordo com o gráfico da Figura 5.28 seriam produzidos 1555 MWh.

Contudo, esta zona funciona como entrada e saída de navios do estuário pelo que seria difícil assegurar todas as condições de segurança necessárias à navegação em alturas de elevada agitação. Outra questão relacionada com a instalação de um aproveitamento nesta zona refere-se à possível obstrução de partes do canal e consequente alteração da dinâmica do transporte sedimentar. Assim será calculada para comparação com outras secções a energia produzida anualmente por um equipamento submerso de 100m de largura por 5m de altura, que neste caso seria de 819MWh.

De forma a exemplificar e ilustrar o comportamento da velocidade da corrente é apresentada na Figura 5.25 a sua variação ao longo do tempo, pois nos restantes gráficos expostos os vários cenários estão sobrepostos de forma a facilitar a sua compreensão.



Fig.5.24 – Representação da zona em análise, a cor azul está identificado o canal de navegação e a cor vermelha a zona de possível instalação de equipamentos de geração de energia.

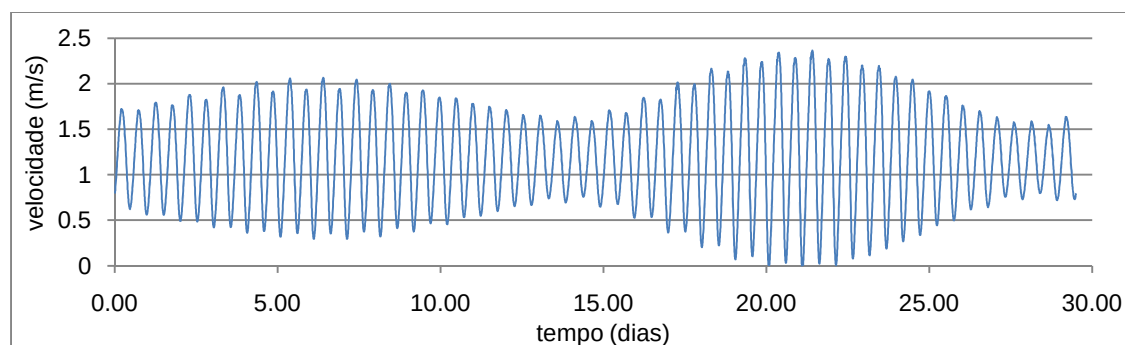


Fig.5.25 – Velocidade da corrente na zona em estudo para um caudal de $1200\text{m}^3/\text{s}$ durante um ciclo lunar.

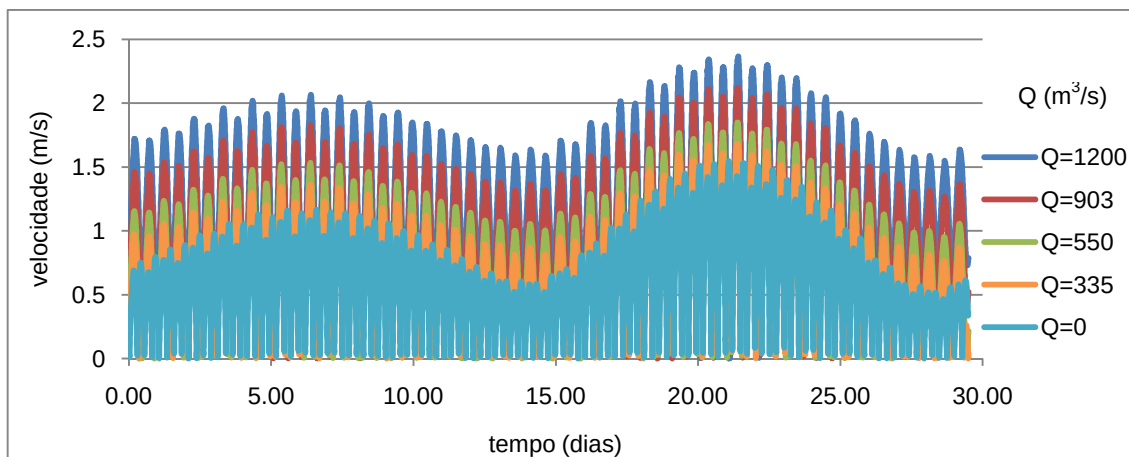


Fig.5.26 – Velocidade da corrente na zona em estudo para os diferentes cenários de cálculo.

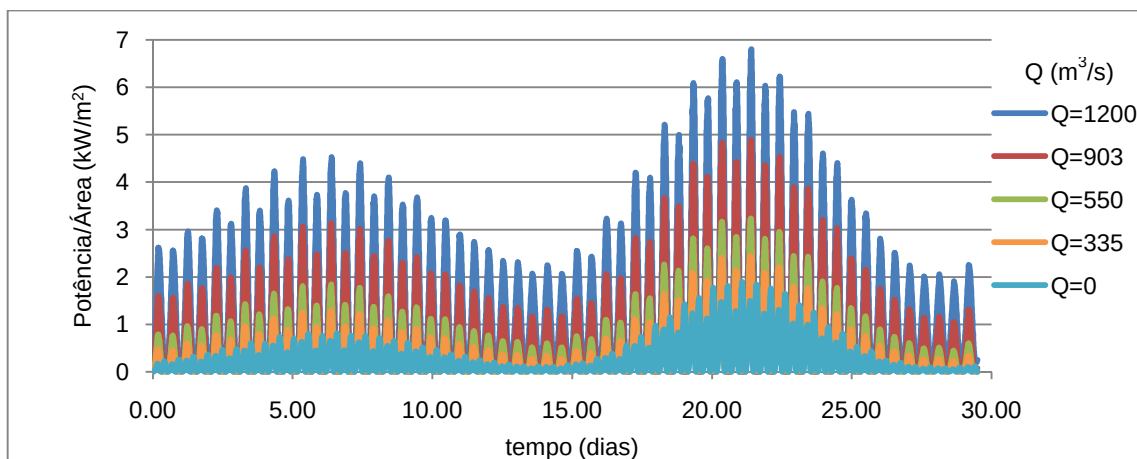


Fig.5.27 – Potência disponível por metro quadrado na zona em estudo para os vários cenários de cálculo

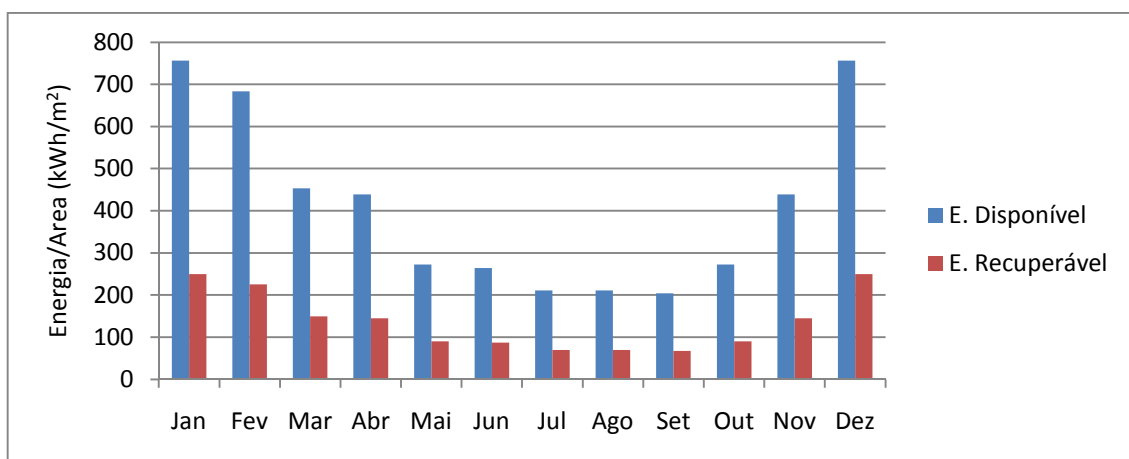


Fig.5.28 – Energia anual disponível e recuperável por metro quadrado, referente à zona em estudo.

5.4.2. SECÇÃO DA PONTE D. LUIZ I

Nesta secção verifica-se a largura mínima do estuário de 135m e uma profundidade média de -11.5m relativamente ao ZH, em que o potencial energético aumenta consideravelmente em relação às secções adjacentes sendo confinado a uma secção restrita. A instalação de um aproveitamento nesta secção terá de ter em conta as limitações referentes ao canal de navegação e à própria ponte D. Luiz I. Nesta zona a instalação de um aproveitamento com uma área útil de 500m² seria capaz de produzir anualmente 155 MWh. Nas Figuras 5.29 a 5.31 são apresentados os resultados referentes à velocidade média da corrente, à potência e à energia anual referente à secção em estudo.

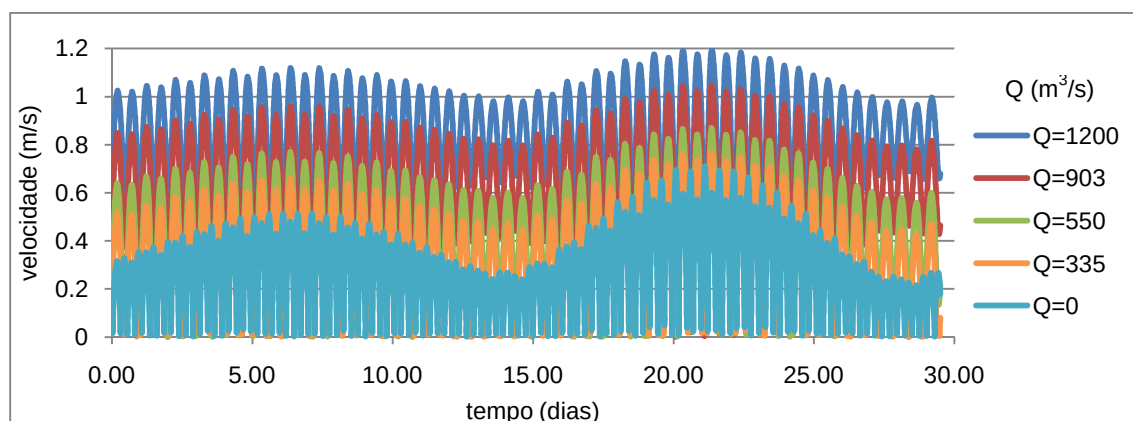


Fig.5.29 – Velocidade da corrente na secção em estudo para os diferentes cenários de cálculo.

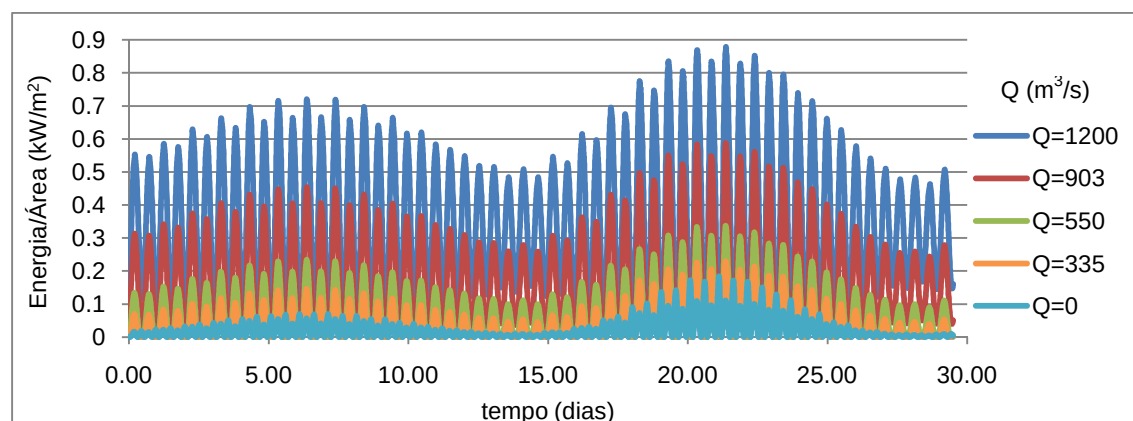


Fig.5.30 – Potência disponível por metro quadrado na secção em estudo para os vários cenários de cálculo

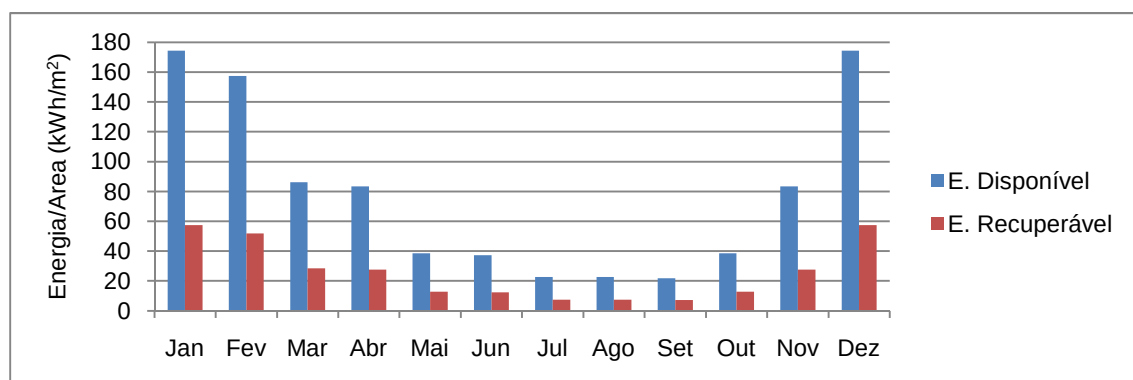


Fig.5.31 – Energia anual disponível e recuperável por metro quadrado, referente à secção em estudo.

5.4.3. SECÇÃO DA PONTE DO INFANTE

A secção da ponte do Infante tem uma largura de 155m e uma profundidade média de -12m ZH, estando o potencial energético relativamente confinado a esta secção à semelhança da zona analisada anteriormente, relativa à ponte D. Luiz I. Nesta zona a instalação de um aproveitamento com uma área útil de 500m² seria capaz de produzir anualmente 159 MWh, sendo o seu projecto limitado essencialmente pelo canal de navegação existente. Nas Figuras 5.32 a 5.34 são apresentados os resultados referentes à velocidade média da corrente, à potência e à energia anual referente à secção em estudo.

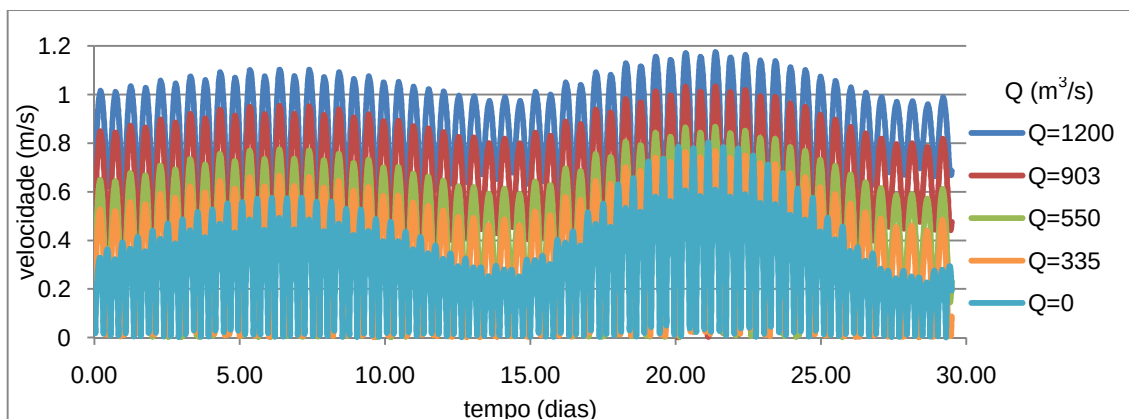


Fig.5.32 – Velocidade da corrente na secção em estudo para os diferentes cenários de cálculo.

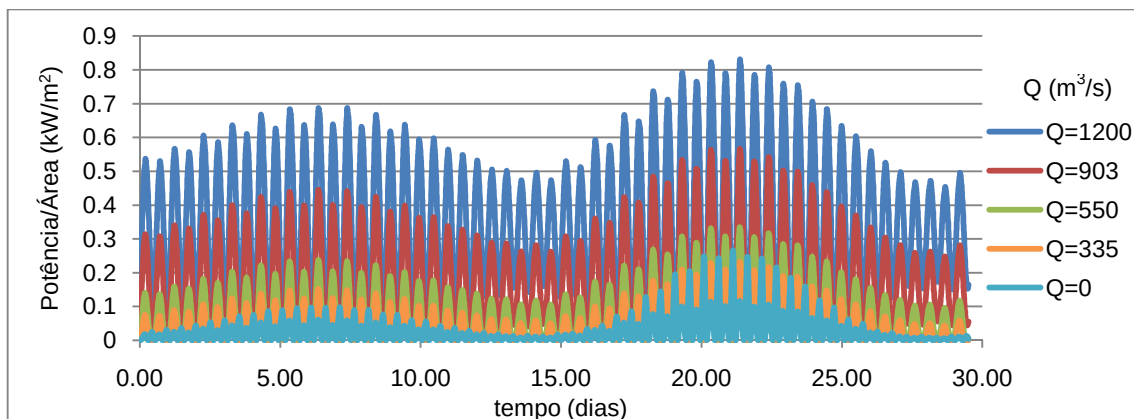


Fig.5.33 – Potência disponível por metro quadrado na secção em estudo para os vários cenários de cálculo

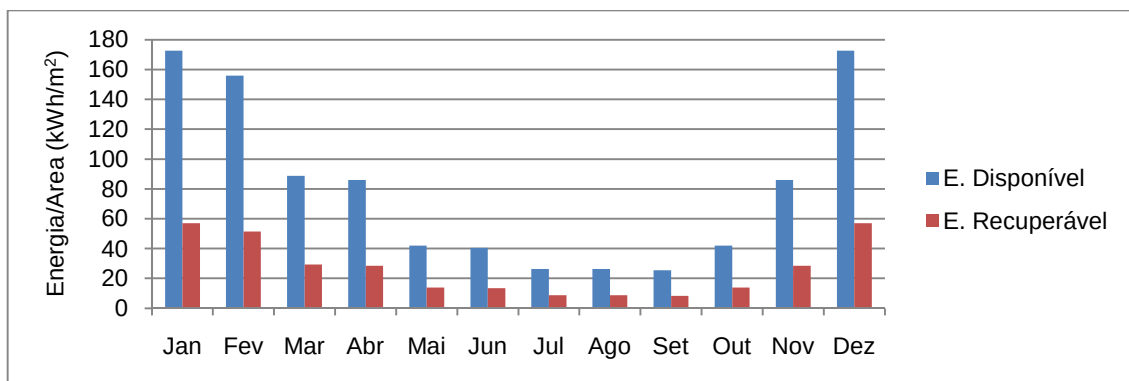


Fig.5.34 – Energia anual disponível e recuperável por metro quadrado, referente à secção em estudo.

5.4.4. ZONA DA ALFÂNDEGA DO PORTO

Na zona da Alfândega do Porto o potencial energético susceptível de ser aproveitado encontra-se circunscrito a certos pontos com uma área bastante restrita. Desta forma os equipamentos instalados estariam apenas localizados nesses pontos, sendo a sua instalação limitada essencialmente pelo canal de navegação existente e pelo acesso ao cais da Alfândega. Contudo para comparação com as secções em estudo calculou-se que a instalação de um aproveitamento com uma área útil de 500m² seria capaz de produzir anualmente 101 MWh,. Nas Figuras 5.35 a 5.37 são apresentados os resultados referentes à velocidade média da corrente, à potência e à energia anual referente à zona em estudo.

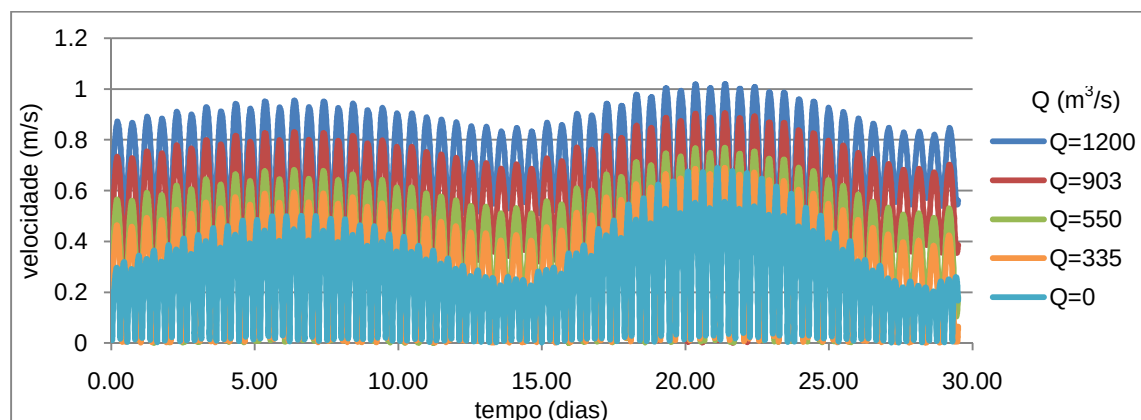


Fig.5.35 – Velocidade da corrente na zona em estudo para os diferentes cenários de cálculo.

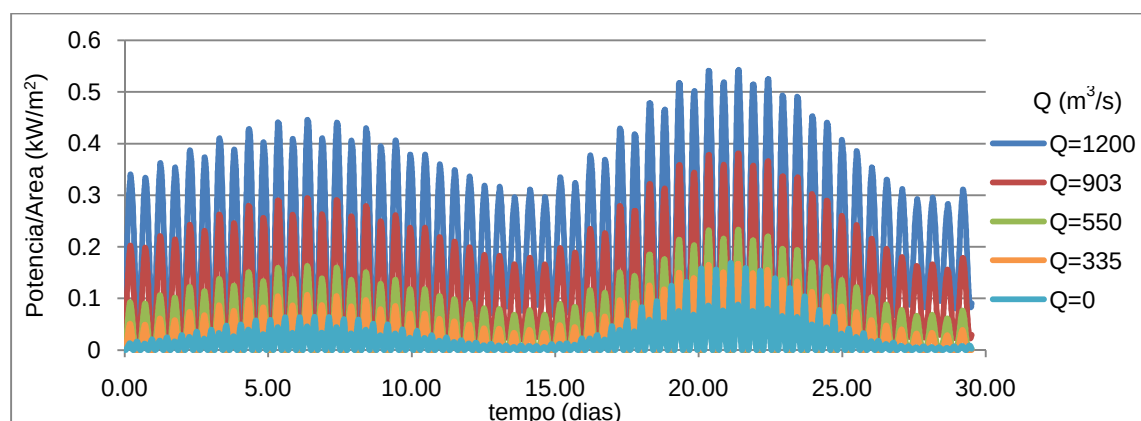


Fig.5.36 – Potência disponível por metro quadrado na zona em estudo para os vários cenários de cálculo

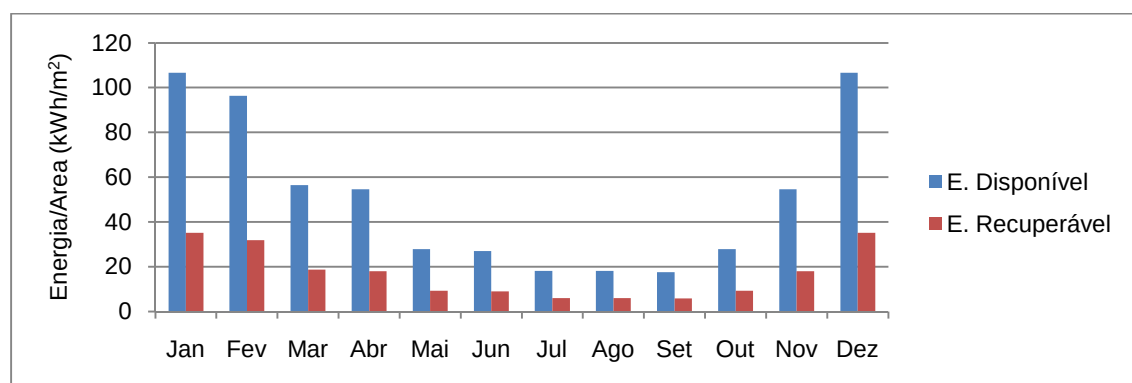


Fig.5.37 – Energia anual disponível e recuperável por metro quadrado, referente à zona em estudo.

5.4.5. ZONA DA PONTE DA ARRÁBIDA

À semelhança da zona adjacente à Alfândega do Porto, na zona da Ponte da Arrábida o potencial energético susceptível de ser aproveitado é menor e encontra-se apenas circunscrito a certos pontos. Desta forma os equipamentos instalados estariam apenas localizados nesses pontos, sendo a sua instalação limitada essencialmente pelo canal de navegação. Para comparação com as secções em estudo calculou-se que a instalação de um aproveitamento com uma área útil de 500m^2 seria capaz de produzir anualmente 76 MWh,. Nas Figuras 5.38 a 5.40 são apresentados os resultados referentes à velocidade média da corrente, à potência e à energia anual referente à zona em estudo.

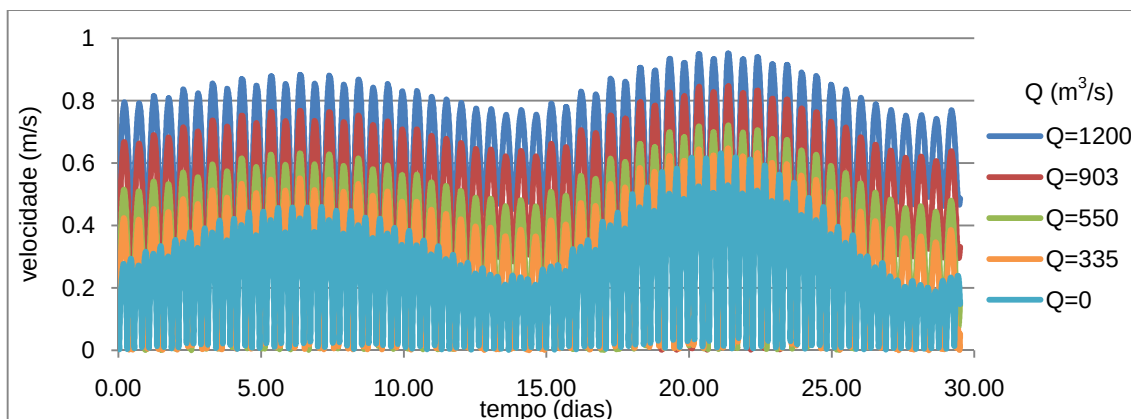


Fig.5.38 – Velocidade da corrente na zona em estudo para os diferentes cenários de cálculo.

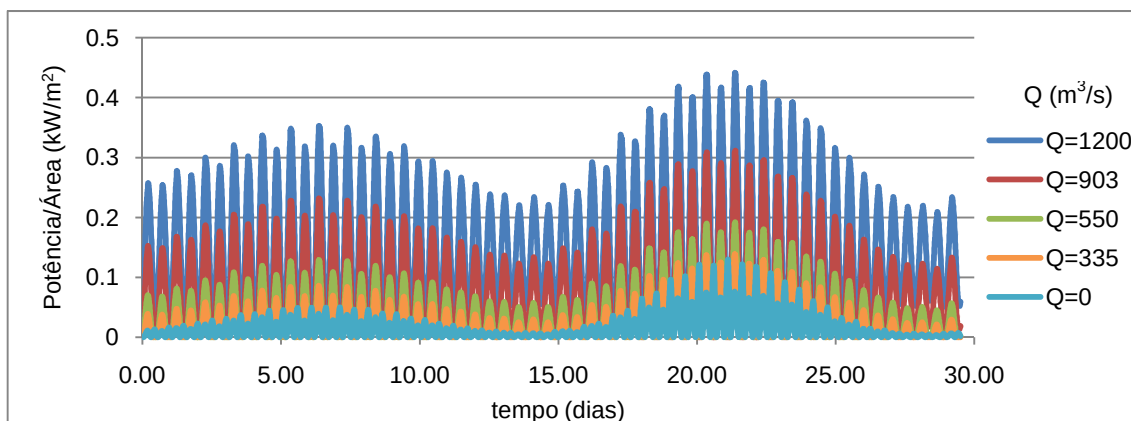


Fig.5.39 – Potência disponível por metro quadrado na zona em estudo para os vários cenários de cálculo

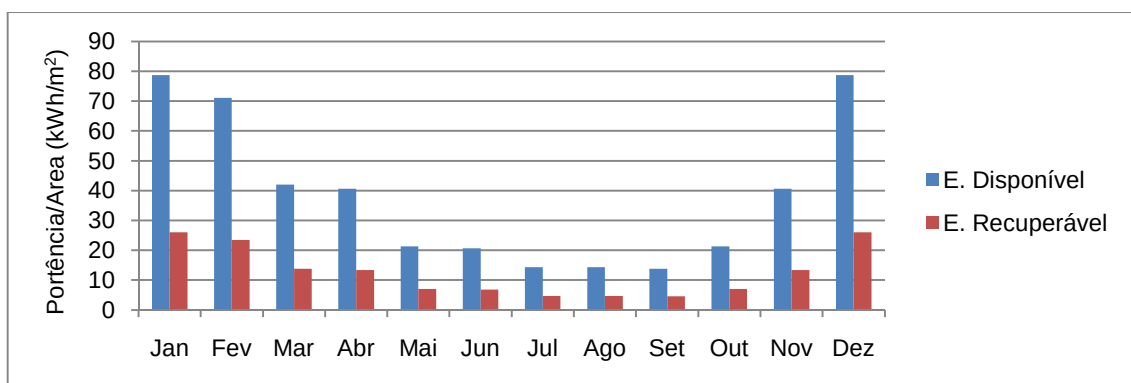


Fig.5.40 – Energia anual disponível e recuperável por metro quadrado, referente à zona em estudo.

A velocidade da corrente do estuário do rio Douro, para além de influenciada pelas previsíveis forças de maré, encontra-se afectada de forma muito significativa pelo caudal afluente ao estuário que varia de acordo com a época de ano e as descargas de turbinamento da barragem de Crestuma-Lever. Assim, o processo de produção energética é de certa forma coordenado e condicionado com as descargas da barragem de Crestuma, sendo durante este processo disponibilizada maior potência ao sistema. Neste sentido o potencial energético avaliado deve ser denominado de aproveitamento da energia das marés e caudais do estuário do rio Douro.

Outro factor relevante está relacionado com a localização do aproveitamento, que como se observa no gráfico da Figura 5.41, é determinante para a rentabilidade do sistema instalado. No quadro 5.3 é apresentado para cada zona o resultado do cálculo da energia produzida anualmente por um equipamento instalado no estuário com uma área útil de geração de 500m² (por exemplo 100m de comprimento por 5m de altura).

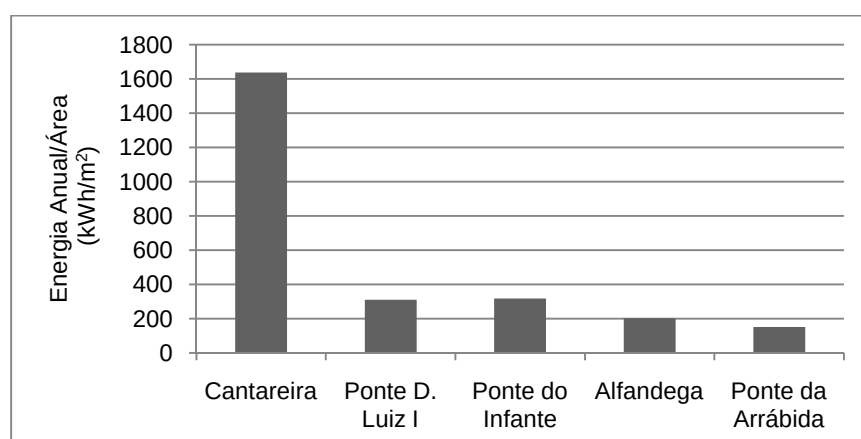


Fig.5.41 – Energia anual recuperável por metro quadrado nas zonas em estudo.

Quadro 5.3 – Energia anual produzida por um sistema padrão com uma área útil de 500m².

Local de estudo	Energia Anual (MWh)
Cantareira	819
Ponte D. Luiz I	155
Ponte do Infante	159
Alfandega	101
Ponte da Arrábida	76

Tendo em conta que actualmente em Portugal o consumo de electricidade médio anual de uma habitação é 3 MWh, [110], o potencial energético da maior parte das zonas estudadas não será muito significativo, devido à falta de dimensão do sistema passível de ser instalado e às velocidades de escoamento relativamente baixas. Contudo, para a zona da Cantareira a instalação de um aproveitamento com uma área útil de 500m² poderia ter um impacto significativo sendo capaz de garantir electricidade a 270 habitações. Um dado curioso que evidencia o potencial da zona em estudo, relaciona a área útil de equipamento instalado necessário para fornecer electricidade a uma habitação, que é da ordem dos 2m² de equipamento por habitação.

Numa simples análise do retorno de investimento realizada para a zona de maior potencial (Cantareira), ele seria conseguido ao fim de 11 anos, considerando o custo do equipamento instalado

igual a 1750€/m², [111], e o preço obtido pela energia produzida igual a 0.1€/kWh. Esta análise não contempla os custos de manutenção e operação que deverão ser tidos em conta numa análise detalhada de viabilidade financeira do investimento.

De referir que o cálculo energético apresentado tem como base a velocidade média modelada para as zonas em estudo. Esta velocidade não caracteriza de forma completa o escoamento, pois a intensidade desta varia também com a profundidade. Assim para um cálculo mais exacto seria importante ter em consideração a profundidade de instalação dos equipamentos e a respectiva zona útil para geração de energia.

Como se verificou a solução mais viável, para o troço do estuário analisado, seria a instalação de um sistema de aproveitamento energético na embocadura do estuário, na zona adjacente à Cantareira. Esta zona como já foi identificada é a que apresenta maiores velocidades de escoamento, porém a modelação efectuada poderá não caracterizar de forma fidedigna este facto. A construção dos molhes do Douro teve como objectivo melhorar a navegabilidade na embocadura e estabilizar a restinga que se tem alterado ao longo dos anos, Figura 5.42. Esta dinâmica na morfologia da restinga poderá induzir a resultados incertos nesta zona, visto que a batimetria utilizada para a construção do modelo é anterior à configuração actual resultante da interacção com os Molhes do Douro. Neste caso e admitindo que a profundidade do canal se mantém relativamente constante, pode-se concluir que o aumento da secção de escoamento tenderá a diminuir a velocidade do escoamento reduzindo o potencial energético calculado anteriormente. Esta incerteza local na modelação da batimetria real deve ser considerada e estudada de forma detalhada numa possível análise de viabilidade do projecto.



Fig.5.42 – Evolução da restinga do Cabedelo; a imagem de fundo refere-se a 2007, o limite a cor verde apresenta a morfologia em 2004 e o limite de cor vermelha a de 2003 (adaptado do Google Earth).

5.4.6. SOLUÇÕES TÉCNICAS

As soluções técnicas apresentadas seguem uma abordagem teórica, tendo por base as condições da morfologia do estuário, referenciando algumas questões ambientais e restrições relativas à instalação de um aproveitamento da energia das marés e caudais.

As zonas e secções adjacentes referidas para instalação de sistemas de geração energética são caracterizadas por uma largura compreendida entre 150 a 300m. Dadas as características do estuário e

o desenvolvimento actual da tecnologia de geração de energia através das correntes de maré, os sistemas capazes de garantir maior fiabilidade são as convencionais turbinas de eixo horizontal e as turbinas de eixo vertical. Pode-se destacar em relação às turbinas de eixo horizontal as apresentadas pela *Verdant Power* (referida em 3.9) testadas e instaladas no *East River*, Nova Iorque, que devido às suas dimensões possibilitam a instalação em baixas profundidades. Esta hipótese tem como base a criação de um campo submerso de turbinas dispostas ao longo do canal num mono pilar que serve de fundação, Figura 5.43.

As soluções expostas de turbinas de eixo horizontal apresentam maior variabilidade nas suas dimensões e modos de instalação. Podem ser ancoradas ao fundo num mono pilar, instaladas em estruturas flutuantes ou em módulos capazes de serem agrupados. As ancoradas num mono pilar (referidas em 3.22, 3.28, 3.34 e 3.35) têm um funcionamento semelhante ao das turbinas de eixo horizontal sendo essencial para a sua rentabilidade criar um campo de aproveitamento ao longo do canal, este aspecto torna pouco viável a sua instalação quando o potencial energético se encontra bastante localizado em zonas específicas como o analisado no caso de estudo.

As turbinas instaladas em estruturas flutuantes (apresentadas em 3.17, 3.21, 3.32) têm como principal vantagem o fácil acesso nas manobras de manutenção, a garantia que se encontram sempre submersas acompanhando o nível da água e a possibilidade de facilmente se deslocarem para outra zona, em alguns casos podem também apresentar uma estrutura modular. Este tipo de tecnologia tem como principal vantagem a mobilidade, sendo o custo da base gravítica ou das estacas de fundação substituído pelo da estrutura flutuante, que terá posteriormente de ser ancorada. Em casos de demonstração ou em projectos-piloto é uma hipótese que tem a seu favor não deixar qualquer alteração no meio onde foi instalada. Na Figura 5.43 é possível observar uma fotomontagem de um aproveitamento flutuante instalado na zona da Cantareira.



Fig.5.43 – À esquerda: Representação de um campo de aproveitamento da energia das marés, [47]; À direita: Fotomontagem de um aproveitamento flutuante instalado na zona da Cantareira.

Os sistemas caracterizados por soluções modulares (referidos em 3.20, 3.19 e 3.18) são capazes de se adaptar a várias situações, nomeadamente a possibilidade de construção de um "muro" composto por vários módulos. Esta característica poderá ser interessante em situações onde o potencial energético se encontra localizado numa secção do canal. Outra oportunidade desta tecnologia reside na sua utilização em zonas com menor potencial aliada a uma contracção do canal capaz de aumentar a velocidade de escoamento na barreira onde estão instaladas as turbinas. No caso de estudo poderia a título de exemplo ser construído um aproveitamento numa secção do estuário com um funcionamento

semelhante ao de uma barragem móvel, *i.e.* seria construído um sistema de comportas capaz de garantir um aumento da velocidade de escoamento adjacente à barreira de módulos ou integrando os módulos nas comportas, o canal de navegação poderia ser deixado livre acarretando um desperdício de energia ou funcionar por uma das comportas. Esta solução móvel teria também de garantir a não interferência no escoamento em caso de caudais extremos de forma a não potenciar situações de cheia.

Uma outra solução mais plausível e que poderia funcionar como projecto de demonstração, assenta na junção deste projecto com um anseio da cidade, uma ponte pedonal entre o Cais de Gaia e a Ribeira ou Alfândega. Ultimamente têm sido apresentados vários projectos referentes à construção de uma ponte pedonal entre as duas margens das quais se destacam a proposta do Arq. Pedro Balonas (Cais de Gaia – Alfândega), a do Eng. Adão da Fonseca (Cais de Gaia – Ribeira) e duas propostas apresentadas por alunos da FEUP sob orientação do Eng. Álvaro Azevedo (Cais de Gaia – Ribeira e uma reconstituição da ponte Pênsil). Nesta perspectiva seria uma mais-valia a realização de um projecto que incorporasse a instalação de sistemas de aproveitamento de energia das correntes de maré. A construção de uma ponte pedonal “azul” ou “d’ouro” ao invés de “verde” numa alusão à água que produz a energia e às cores que de certa forma identificam a região poderia significar um marco emblemático das cidades do Porto e Gaia, promovendo os valores da união e sustentabilidade ambiental.

A utilização de sistemas baseados em estruturas flutuantes, poderia de certa forma estabelecer uma recriação histórica da antiga “ponte das barcas”, sendo o canal de navegação deixado livre. Na área do canal de navegação poderia ser criada uma passagem suspensa capaz de garantir o trânsito de navios ou uma ponte móvel com o mesmo propósito. Esta solução seria funcional em termos de manutenção e desobstrução da secção do estuário em caso de caudais extremos de cheia.

5.4.7. IMPACTES

A instalação deste tipo de equipamentos no estuário do rio Douro provocará sempre impactes positivos e negativos, qualquer que seja a sua forma e composição pelo que teriam que ser cuidadosamente analisados. Neste caso os impactes podem ser divididos em ambientais, morfológicos, paisagísticos, e socioeconómicos, contudo sem um projecto concreto é difícil enumerar a totalidade dos impactes recorrentes da construção e utilização dos equipamentos. Assim, serão expostos de forma simplificada alguns dos possíveis impactes que um projecto desta natureza poderá causar.

Em termos ambientais não se prevêem impactes negativos consideráveis, pois vários equipamentos referem a baixa velocidade de rotação das suas hélices de modo a não interferir na vida marinha, contudo, este aspecto deve ser cuidadosamente analisado tendo em conta o ambiente de instalação e as espécies autóctones potencialmente afectadas. Outro aspecto ambiental e de grande relevância socioeconómica relaciona-se com a ocorrência de caudais extremos de cheia. Neste cenário os equipamentos instalados poderão funcionar como uma barreira ao escoamento podendo ampliar o risco de cheia em determinadas áreas, sendo necessário encontrar formas de mitigar este problema.

Os impactes socioeconómicos de um projecto viável terão sempre um saldo bastante positivo, não só pelo natural retorno financeiro da venda de energia directamente no centro de consumo, mas também pela imagem de sustentabilidade ambiental transmitida. O facto do projecto se encontrar inserido entre as cidades do Porto e Gaia, próximo das zonas de visita turística obrigatória, potencia o reposicionamento da imagem da cidade numa perspectiva de modernidade e sustentabilidade.

O centro histórico da cidade do Porto classificado como Património da Humanidade pela UNESCO é uma zona sensível a alterações paisagísticas. Admitindo-se que o projecto se situa nesta zona deverão

ser tomadas medidas de forma a mitigar esse impacto, todavia este só será muito evidente se os sistemas instalados se encontrarem em estruturas flutuantes.

Qualquer que seja a solução adoptada terá em conta restrições referentes à navegabilidade delimitadas actualmente por um canal de navegação de 60m de largura e o acesso aos cais existentes. Nessas zonas as condições de segurança para a navegação poderão diminuir, especialmente na realização de manobras e em caso de forte agitação. É também necessário identificar à superfície a localização dos equipamentos quando estes se encontram submersos, precavendo de forma clara e visível possíveis acidentes.

Os impactes morfológicos poderão estar relacionados com alteração da dinâmica do transporte sedimentar e o modo como a instalação de sistema de geração energética potencie processos de sedimentação ou erosão. Este aspecto é relevante não só por questões ambientais mas também na manutenção e operacionalidade dos sistemas instalados.

5.4.8. ANÁLISE SWOT

Com o intuito de identificar de forma explícita as forças (*Strengths*), fraquezas (*Weaknesses*), oportunidades (*Opportunities*) e ameaças (*Threats*) derivadas da instalação de um aproveitamento da energia das marés e caudais efluentes de Crestuma no estuário do rio Douro, foi realizada uma análise SWOT apresentada na Figura 5.44.

PONTOS FRACOS	PONTOS FORTES
• Custo do equipamento; • Custos de monitorização elevados devido à implementação de tecnologias recentes; • Maior condicionamento de secções canal • Reduzida escala do aproveitamento • Falta de avaliação do efeito dos caudais de cheia extremos nos equipamentos.	• Energia produzida de forma previsível no centro de consumo; • Impactes visuais nulos ou reduzidos; • Impactes Ambientais reduzidos; • Processos de instalação e manutenção simples, facilitados pela baixa profundidade e escassa agitação no estuário.
AMEAÇAS	OPORTUNIDADES
• Possível risco para a navegabilidade; • A realização de um projecto deste tipo terá de ser bastante positiva de forma a não suscitar uma desconfiança pública em relação a este tipo de aproveitamento energético; • Deterioração do equipamento.	• Reposicionar a imagem da cidade/região com este projecto de aproveitamento de energia renovável; • Beneficiação socioeconómica; • Gestão sustentável dos Recursos Hídricos; • Oportunidade económica face a um recurso até agora pouco explorado; • Benefício de programas de apoio financeiro.

Fig.5.44 – Análise SWOT relativa à instalação de um aproveitamento da energia das marés e caudais efluentes de Crestuma no estuário do rio Douro

6

CONCLUSÕES

6.1. CASO DE ESTUDO

O presente estudo teve como objectivo a avaliação do potencial energético das marés no estuário do rio Douro recorrendo à modelação da hidrodinâmica do estuário com o auxílio do *software* MOHID.

A construção do modelo revelou-se um processo moroso e delicado, especialmente na definição da batimetria. Foram compilados uma serie de dados relativos ao estuário médio e inferior e caracterizada de forma simplificada o restante estuário, a montante da ponte do Freixo. Este processo é uma das etapas mais determinantes para o sucesso do modelo, pois a definição da batimetria induz directamente a qualidade dos resultados obtidos. Os dois principais problemas identificados referem-se à inexistência de dados fidedignos a montante da ponte do Freixo e à batimetria desactualizada da embocadura do estuário, não caracterizadora da dinâmica sedimentar provocada pela construção dos molhes do Douro.

O processo de calibração e validação do modelo foi realizado com sucesso para o estuário inferior e médio, sendo ignorados os resultados obtidos no estuário superior devido à impossibilidade de validação do modelo nessa zona. Este facto está relacionado com inexistência de dados batimétricos fidedignos e com a ausência de informações relativas às velocidades observadas no estuário superior. Desta forma o estudo do potencial energético do estuário superior tornou-se inviável, todavia, como a oscilação dos níveis de maré vai diminuindo ao longo do desenvolvimento do estuário para montante, pode considerar-se que de uma maneira geral, o potencial energético das marés é menos relevante na zona superior do estuário.

Verificou-se que o potencial estudado resulta do efeito conjunto das forças de maré e dos caudais efluentes da barragem de Crestuma-Lever, sendo estes preponderantes nos resultados obtidos para as velocidades médias da corrente. A análise dos resultados foi validada para o estuário inferior onde o potencial energético se concentra em determinadas secções do rio, destacando-se a zona da embocadura, junto à Cantareira, em que a intensidade da corrente é mais elevada atingindo valores de 2.4m/s no pico da vazante de uma maré viva. Este aspecto evidência de forma destacada a secção da Cantareira em relação ao restante estuário, propondo-se a instalação de um aproveitamento da energia das marés e caudais efluentes de Crestuma com uma área útil de 500m², capaz de gerar anualmente 819 MWh ou seja 70.4 tep (tonelada equivalente de petróleo).

Foram também identificadas outras secções onde a intensidade da corrente atinge valores superiores a 1m/s, identificando-se a zona adjacente ao edifício da Alfandega do Porto e as secções das pontes da Arrábida, D. Luiz I e Infante, com um potencial anual compreendido entre 150 e 300 kWh/m². Para estas zonas foram apresentadas propostas mais arrojadas, tendo como principal objectivo a

dinamização e modernização da imagem das cidades. A profundidade média do estuário estudado é relativamente baixa condicionando o tipo de sistemas passíveis de ser instalados, visto que grande parte dos sistemas são projectados para instalação em ambientes oceânicos a profundidades consideráveis. Porém, qualquer solução adoptada requererá um estudo mais detalhado tendo em conta a variação da velocidade em profundidade e a real caracterização dos impactes causados no meio envolvente.

6.2. EQUIPAMENTOS E TECNOLOGIAS ABORDADAS

O aproveitamento da energia das correntes de maré encontra-se numa fase incipiente, já com alguns projectos instalados de carácter comercial, contudo a maioria dos projectos existentes são ainda de carácter experimental com o intuito de validar os sistemas propostos. Constatase que a tecnologia mais utilizada baseia-se na turbina de eixo horizontal. Esta tecnologia revela também maior sucesso comercial, podendo este facto estar relacionado com uma maior experiência adquirida no ramo dos aproveitamentos eólicos. As turbinas de eixo vertical têm evoluído de forma muito significativa sendo também uma solução implementada comercialmente e que tem a vantagem de oferecer maior adaptação a diferentes formas de instalação, nomeadamente em estruturas flutuantes ou modulares. Outras tecnologias como a lâmina oscilante ou o aproveitamento da energia dos vórtices estão ainda em fase de desenvolvimento apresentando resultados de desempenho bastante positivos.

Outro aspecto importante relaciona-se com o meio e a profundidade de instalação dos equipamentos, admitindo-se para as soluções convencionais uma análise de viabilidade do potencial energético em zonas onde a velocidade da corrente é superior a 1m/s.

6.3. OPORTUNIDADES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

No seguimento do estudo realizado, algumas oportunidades e sugestões para a realização de trabalhos futuros são de seguida apresentadas com vista a complementar e desenvolver os resultados obtidos neste estudo. Salientam-se algumas que se relacionam com as limitações do estudo apresentado e outras que poderão alargar o âmbito deste estudo a outros mais abrangentes ou identificação de oportunidades. Desse modo e para o efeito enumeram-se os seguintes pontos:

Em relação ao caso de estudo do estuário do rio Douro, este trabalho poderá contribuir para processos de tomada de decisão em relação ao avanço para um estudo mais detalhado da viabilidade de um projecto de aproveitamento da energia das marés e caudais ou para descartar a aplicação desta solução no Estuário.

Verifica-se que o uso da modelação hidrodinâmica é um bom meio para avaliação deste potencial energético sendo possível caracterizar de forma fidedigna a realidade em estudo. Contudo, é essencial ter em conta a qualidade dos dados para a construção e calibração do modelo. Uma das limitações deste trabalho está relacionada com a qualidade dos dados referentes à batimetria do estuário superior e à inexistência de dados de calibração para essa zona, que posteriormente impossibilitaram a análise desses resultados.

Qualquer trabalho subsequente realizado com a perspectiva de caracterizar o estado da arte desta área deverá ter em conta a sua dinâmica específica e o rápido desenvolvimento dos equipamentos e tecnologias apresentadas. Os aqui expostos referem-se às informações disponibilizadas à data da realização deste estudo em que certos dados são mantidos confidenciais pelas empresas e organizações que desenvolvem este tipo de sistemas.

BIBLIOGRAFIA

- [1] "Resolução do Conselho de Ministros nº 169/2005 - Estratégia Nacional para a Energia," ed: Diário da República nº 204, série I, parte B de 24/10/2005.
- [2] D. Lenardic. *Large-Scale Photovoltaic Power Plants Ranking - Annual and Cumulative Installed Power output Capacity Key Statistical Indicators*. (2010, www.pvresources.com).
- [3] "World Wind Energy Report 2009," World Wind Energy Association, Germany 2010.
- [4] "Plano Nacional de Acção para a Eficiência Energética — Portugal Eficiência 2015," ed: Diário da República, n.º 97, série I de 20/05/2008
- [5] "Resolução do Conselho de Ministros nº 29/2010 - Estratégia Nacional para a Energia 2020," ed: Diário da República, n.º 73, série I de 15/04/2010
- [6] C. Almeida, "Aproveitamento da energia da onda de maré no estuário do Tejo," Grau de Mestre em Engenharia Física Dissertação de mestrado, Física, Universidade de Aveiro, Aveiro, 2008.
- [7] I. C. Rebordão, "Análise do Potencial Energético dos Fluxos de Maré no Estuário do Rio Lima," Mestre em Engenharia Civil Mestrado, Instituto Superior Técnico, Lisboa, 2008.
- [8] N. Martins, C. Rodrigues, R. Pereira and H. Calisto, "Estudo do potencial energético das marés na Barra do Porto de Aveiro recorrendo a técnicas de mecânica dos fluidos computacional," ed. Conferência "Engenharias'07 - Inovação e Desenvolvimento", 2007.
- [9] C. Almeida, P. Silva, M. Madden, J. C. Amador and X. Bertin, "Avaliação do Potencial de Aproveitamento da Energia da Maré na Ria Formosa," presented at the 1º Seminário sobre Gestão de Bacias Hidrográficas - "As Regiões Hidrográficas do Norte e as Perspectivas Futuras de Gestão", 2009.
- [10] *Tidal Energy (World Ocean Observatory ed.)*. (2010, 24/02/10). Available: http://www.thew2o.net/events/oceanenergy/images/tidal_energy.pdf
- [11] F. V. Gomes and F. T. Pinto, "Marés," in *Trabalhos Marítimos 1 (Elementos de apoio às Aulas)*, ed. Porto: FEUP, 2008.
- [12] P. A. Breeze, *Power generation technologies*. Amsterdam ; Boston, Burlington: Elsevier ; Newnes, 2005.
- [13] R. H. Charlier and L. Ménanteau, "The saga of the tide mill: Renew. Sustain," *En. Rev.*, 1999.
- [14] *Moinhos de Maré do Ocidente Europeu*. (2010, 02/26/10). Available: <http://www.moinhosdemare-europa.org/>
- [15] D. Tiago, "Assembleia Municipal de Aveiro," ed, 2008.
- [16] A. Silva, "Moinho da Torre, Estuário do Tejo ", ed, 2005.
- [17] J. Giesecke and E. Mosonyi, "Wasserkraftanlagen - Planung, Bau und Betrieb," *Heidelberg: Springer-Verlag* pp. 107-115, 2005.
- [18] *La Rance Barrage, France (Department of Energy and Climate Change ed.)*. (2010, 03/04/10). Available: http://www.decc.gov.uk/en/content/cms/what_we_do/uk_supply/energy_mix/renewable/severn_tidal_power/images/images.aspx

- [19] Y. H. Bae, K. O. Kim and B. H. Choi, "Lake Sihwa tidal power plant project," *Ocean engineering*, vol. 37, pp. 454-463, 2010.
- [20] *Tidal plant to power Incheon (JoongAng Daily ed.)*. (2009, 02/03/10). Available: <http://joongangdaily.joins.com/article/view.asp?aid=2907377>
- [21] "United Kingdom Atomic Energy Authority (UKAEA)," Preliminary survey of small scale tidal energy. Severn tidal power report, Binnie & Partners 1984.
- [22] C. Baker, "Tidal Power," *Energy Policy*, vol. 19, pp. 792-797, Oct 1991.
- [23] wikipedia. Available: http://en.wikipedia.org/wiki/Severn_Barrage
- [24] A. M. Gorlov, "Tidal Energy," ed: Northeastern University, Boston, Massachusetts, USA, 2001, pp. 2955, 2960.
- [25] *The Ocean Renewable Energy Group (OREG)*. (2010, 06/03/10). Available: www.oreg.ca
- [26] *Kislaya Guba, (wikipedia)*. (2010, 06/03/10). Available: http://en.wikipedia.org/wiki/Kislaya_Guba
- [27] *China Renewable Energy Scale-up Program*. (2010, 04/03/10). Available: <http://www.cresp.org.cn/uploadfiles/73/613/zhejiang.html>
- [28] *The Energy Island: A Gigantic Offshore Battery?* (2007, 05/03/10). Available: <http://www.ecogeek.org/content/view/1017/40/>
- [29] *Energy Technology Expert*. (2009, 20/5/10). Available: <http://energytechnologyexpert.com/cost-of-power-generation/sample-levelized-cost-of-energy-the-cheapest-and-most-expensive-technology/>
- [30] T. Cornelius and M. Smith. *Presentation to Offshore Engineering Society - Tidal Stream Energy*. (2009). Available: <http://www.atlantisresourcescorporation.com/download/OES%20Presentation%20London%20Oct%202009.pdf>
- [31] G. Hagerman and B. Polagye, "Methodology for Estimating Tidal Current Energy Resources and Power Production by Tidal In-Stream Energy Conversion (TISEC) Devices," EPRI TP-001-NA Rev 2, 2006.
- [32] A. N. Gorban, A. M. Gorlov and V. M. Silantyev, "Limits of the turbine efficiency for free fluid flow," *Journal of Energy Resources Technology-Transactions of the Asme*, vol. 123, pp. 311-317, Dec 2001.
- [33] M. J. Khan, G. Bhuyan, M. T. Iqbal and J. E. Quaicoe, "Hydrokinetic energy conversion systems and assessment of horizontal and vertical axis turbines for river and tidal applications: A technology status review," *Applied Energy*, vol. 86, pp. 1823-1835, 2009.
- [34] "Edinburgh Designs Ltd." "Variable pitch foil vertical axis tidal turbine. - Final Report, Project T/06/00234/00/00," 2006.
- [35] *Open Hydro*. (2010, 21/03/10). Available: <http://www.openhydro.com>
- [36] *Open Hydro system*. (2009, 21/03/10). Available: http://www.irishtimes.com/newspaper/images/2009/1117/1224258981059_1.jpg
- [37] *Marine Current Turbines Ltd*. (2010, 07/03/10). Available: <http://www.marineturbines.com/21/technology/>

- [38] *SeaGen (wikipedia)*. (2010, 07/03/10). Available: <http://en.wikipedia.org/wiki/SeaGen>
- [39] *Tidal Power Put On The National Grid In Northern Ireland (DeviceDaily.com)*. (2008, 07/03/10). Available: <http://www.devedaily.com/environment/tidal-power-put-on-the-national-grid-in-northern-ireland.html>
- [40] *Hammerfest Strom*. (2010, 05/03/10). Available: <http://www.hammerfeststrom.com>
- [41] *Clean Current*. (2009, 09/03/10). Available: <http://www.cleancurrent.com>
- [42] *Great Race Rock Lighthouse*. (2006, 08/03/10). Available: <http://marinas.com/view/lighthouse/1607>
- [43] *Lunar Energy*. (2008, 25/03/10). Available: <http://www.lunarenergy.co.uk/>
- [44] *Voith Hydro*. (2010, 03/03/10). Available: http://www.voithhydro.com/vs_en_paa_ocean-energy_tidal-current-power-stations.htm
- [45] *REUK.co.uk - TidEl Tidal Turbines*. (2007, 17/03/10). Available: <http://www.reuk.co.uk/TidEl-Tidal-Turbines.htm>
- [46] J. Gordon. *TidEl Harnesses Lunar Energy?* (2005, 20/03/10). Available: <http://www.treehugger.com/files/2005/08/tidel.php>
- [47] *Verdant Power*. (2010, 20/03/10). Available: <http://verdantpower.com/>
- [48] N. Anderson, J. Lanzafane, C. Lehrman and D. Savastano, "U.S. Tidal Power " presented at the Great Problems Seminar: Power the World, Worcester Polytechnic Institute, 2007.
- [49] E. Rattner. *New Technologies Generate Energy from Sea Tide*. (2008, 20/03/10). Available: <http://thefutureofthings.com/news/1133/new-technologies-generate-energy-from-sea-tide.html>
- [50] *Tidal Energy Ltd*. (2010, 21/03/10). Available: <http://www.tidalenergyltd.com/>
- [51] *Ocean Flow Energy Ltd.* . (2010, 22/03/10). Available: <http://www.oceanflowenergy.com/>
- [52] *Evopod*. (2010, 21/03/10). Available: <http://en.wikipedia.org/wiki/Evopod>
- [53] *Atlantis Resources Corporation Pte Limited*. (2010, 22/03/10). Available: <http://www.atlantisresourcescorporation.com/>
- [54] *Hydra Tidal Energy Technology AS*. (2010, 23/03/10). Available: <http://www.hydratidal.com/>
- [55] Statkraft Development AS - Tidal power: Versatile. Reliable. Renewable. [Online]. Available: http://www.aquainfo.no/cms/upload/pdf/Statkraft_Tidal_Power_HR.pdf
- [56] H. Svein, "Floating Device for Production of Energy from Water Currents," European Patent Office, NO20070911 (A), Patent, 2008.
- [57] "Swanturbines confirms ability to install a tidal device at EMEC " Swanturbines Press Release, 12/04/2010.
- [58] *Swanturbines*. (2010, 15/04/10). Available: www.swanturbines.co.uk
- [59] *Underwater Electric Kite - UEK*. (2010, 04/04/2010). Available: <http://uekus.com/>
- [60] *Sabella*. (2010, 04/04/10). Available: <http://www.sabella.fr/eng/sabellaD03.html>
- [61] *Neptune Renewable Energy*. (2009, 24/03/10). Available: <http://www.neptunerenewableenergy.com/>

- [62] "Neptune Renewable Energy gears up for deployment of first full-scale tidal stream power generator in the Humber," Report, 27/11/2009.
- [63] *Lucid Energy Technologies*. (2010, 25/03/10). Available: <http://www.lucidenergy.com/water/>
- [64] F. O Rourke, F. Boyle and A. Reynolds, "Tidal energy update 2009," *Applied Energy*, vol. 87, pp. 398-409, 2010.
- [65] A. M. Gorlov. *Hydraulic Cross-Flow Turbines*. (2005, 05/04/10). Available: <http://gcktechnology.com/GCK/pg2.html>
- [66] S. Anderson, "The Tide-Energy Project near the Mouth of the Amazon" Capturing Energy from River, Tide, and Ocean Currents - "an Example of Efcient, Practical Technology Using the Helical Turbine," ed, 2006.
- [67] *Korea opens its first tidal power-generating plant*. (2009, 25/03/10). Available: <http://www.alternative-energy-fuels.com/water/tidal-power/korea-opens-its-first-tidal-power-generating-plant>
- [68] *Ocean Renewable Power Company*. (2010, 25/03/10). Available: <http://www.oceanrenewablepower.com/orpcpowersystems.htm>
- [69] F. O. Rourke, F. Boyle and A. Reynolds, "Marine current energy devices: Current status and possible future applications in Ireland," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 14, pp. 1026-1036, 2010.
- [70] *Pontedi di Archimede International SPA*. (2010, 26/03/10). Available: <http://www.pontediarchimede.it/>
- [71] *EOLPower / ADAG - Design and production of prototype turbines*. (2010,). Available: <http://www.eolpower.com/english/research.html>
- [72] *Tidal Energy Pty Ltd*. (2009, 26/03/10). Available: <http://www.tidalenergy.net.au/>
- [73] *BioPower Systems Pty Ltd*. (2010, 26/03/10). Available: <http://www.biopowersystems.com/biostream.php>
- [74] *Pulse Tidal*. (2010, 19/05/10). Available: <http://www.pulsegeneration.co.uk/>
- [75] S. Thomson, M. Elliott, N. Cutts, S. Travers, J. Hardisty and H. Nimmo, "The River Humber (upper burcom Tidal Stream Generator) Order" - "Environmental Statement (Final Draft)," ed. University of Hull - Institute of Estuarine & Coastal Studies, 2007.
- [76] I. Bryden and A. Owen. *Robert Gordon University*. (2010, 25/03/10). Available: <http://www4.rgu.ac.uk/cree/general/page.cfm?pge=10769>
- [77] *U.S. Department of Energy - Technology Profile for: Sea Snail*. (2008, 22/03/10). Available: <http://www1.eere.energy.gov/windandhydro/hydrokinetic/information.aspx?id=ddd6653f-a1ba-4103-8115-7d5c77f853ed&type=tech>
- [78] *Stringray Tidal Stream Energy Device - Phase 2*. (2003,). Available: http://www2.env.uea.ac.uk/gmmc/energy/energy_pdfs/stringray_part1.pdf
- [79] *U.S. Department of Energy - Technology Profile for: Stringray*. (2008, 20/03/10). Available: <http://www1.eere.energy.gov/windandhydro/hydrokinetic/information.aspx?ID=5abb4135-e090-489e-a6f5-d20455d84dd4&type=tech>

- [80] *Vortex Hydro Energy*. (2010, 25/03/10). Available: <http://www.vortexhydroenergy.com/technology/>
- [81] M. Bernitsas. (2010) Out of the Vortex. *Mechanical Engineering - The Magazine of ASME*. Available: http://memagazine.asme.org/Articles/2010/April/Out_Vortex.cfm
- [82] *C-Energy*. (2010, 26/03/10). Available: <http://www.c-energy.nl/>
- [83] E. J. Soons, "Analysis of the Wells rotor in oscillating air - & water flows," ed: Co-ordinated Action on Ocean Energies (CA-OE), 2006.
- [84] *Minesto*. (2009, 25/03/10). Available: <http://www.minesto.com/>
- [85] J. A. Clarke, G. Connor, A. D. Grant, C. Johnstone and S. Ordonez-Sanchez, "Contra-rotating Marine Current Turbines: Single Point Tethered Floating System - Stability and Performance ", ed: The University of Strathclyde Institutional Repository, UK, 2009.
- [86] *Tidal Stream*. (2010, 20/05/10). Available: <http://www.tidalstream.co.uk/html/technology.html>
- [87] *Hydro Green Energy*. (2010, 26/03/10). Available: <http://www.hgenergy.com/>
- [88] *Fri-El Sea Power*. (2010, 26/04/10). Available: http://www.fri-el.it/seapower/en/project_sea_power_device.php
- [89] *Current Power AB*. (2009, 26/03/10). Available: <http://www.currentpower.se/>
- [90] *New Energy Corporation Inc.* . (2010, 26/03/10). Available: <http://newenergycorp.ca/>
- [91] F. G. Viana, "Centro Nacional de Referencia em Pequenas Centrais Hidroelectricas (CERPCH) - Turbinas Hidrocinéticas são alternativas na geração energia elétrica no país," ed: Revista: PCH Noticias, 2008.
- [92] *Produtora de Energia Eléctrica Por Hidro-Reação, PEEHR*. (2006, 26/03/10). Available: <http://www.peeher.pt/>
- [93] *MOHID - Modelling Water Resources*. (2010,). Available: <http://www.mohid.com/>
- [94] R. Fernandes, "Modelação de Derrames de Hidrocarbonetos," in *Trabalho Final de Curso - Licenciatura em Engenharia do Ambiente*, ed. Lisboa: Instituto Superior Técnico, 2001.
- [95] M. Santos, A. Silva, P. C. Leitão, H. Coelho and R. Neves, "Aplicação de um modelo hidrodinâmico (MOHID) como ferramenta na avaliação da qualidade da água na Lagoa de Óbidos," presented at the 1º Seminário sobre Sistemas Lagunares e Costeiros, Vila Nova de Santo André, 2004.
- [96] R. Neves, A. Silva, F. Braunschweig, P. C. Leitão, R. Pacheco, P. Pina and G. A. Pita, "Hidroinformática e Optimização da Gestão de Ecossistemas Aquáticos," presented at the A Hidroinformática em Portugal Lisboa, 2001.
- [97] F. Braunschweig and L. Fernandes, "MOHID Graphical User Interfaces User Manual ", ed. Lisboa: Instituto Superior Técnico 2005.
- [98] C. F. Teixeira, "Desnitrificação em sedimentos do estuário do Rio Douro," Mestrado, Engenharia do Ambiente - ramo Ambientes Costeiros, FEUP, Porto, 2005.
- [99] M. E. C. Vieira and A. A. Bordalo, "The Douro estuary (Portugal): a mesotidal salt wedge," ed: Oceanologica Acta vol. 23, p. 585-594., 2000.

- [100] L. Peixeiro and Silva, "Melhoria da Acessibilidade e das Condições de Segurança na Barra do Douro," presented at the 1ª Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária, Porto, 1999.
- [101] "Caudal efluente médio diário, CRESTUMA (EDP) (07G/01A), SNIRH - Sistema Nacional de Informação de Recursos hídricos, 2010."
- [102] J. C. Reis, "O Nível Médio do Mar: de 1910 a 2004," presented at the Jornadas do Mar 2004 – "O MAR: Um Oceano de Oportunidades", Universidade Lusófona Ciências Naturais e Biológicas, 2004.
- [103] P. P. G. Dyke, *Coastal and Shelf Sea Modelling (Topics in environmental fluid mechanics)*. Norwell, USA: Kluwer Academic Publishers, 2001.
- [104] B. Azevedo, P. Duarte and A. A. Bordalo, "Análise e verificação de um modelo ecológico para a albufeira de Crestuma-Lever," ed: Ecodouro, 2002.
- [105] "Campanha Hidromorfológica para estudo da Barra do Douro Set/Out 94 (trabalho realizado a pedido da APDL)," Instituto Hidrográfico, Lisboa, 1995.
- [106] D. R. Neves, J. L. Pinho and J. M. Vieira, "Modelação matemática da hidrodinâmica e intrusão salina no estuário do rio Douro" Universidade do Minho," presented at the " 9º Congresso Nacional da Água, Cascais, 2008.
- [107] Blumberg and L. H. Kantha, "Open boundary condition for circulation models, Journal of Hydraulic Engineering 111, pp. 255-273,," ed, 1985.
- [108] L. Portela, "Sediment transport and morphodynamics of the Douro River estuary," *Geo-Marine Letters*, vol. 28, pp. 77-86, 2008.
- [109] MARETEC - *Descrição do Estuário do Rio Douro*. (2010). Available: http://maretec.mohid.com/Estuarios/MenuEstuarios/Descric%C3%A7%C3%A3o/descricao_Douro.htm
- [110] J. D. Coelho, "Pacto dos Autarcas "Uma Iniciativa Europeia Dois Projectos em Acção"," presented at the PCEEE - Portugal em Conferência para uma Economia Energeticamente Eficiente Fundação Calouste Gulbenkian - Lisboa, 2010.
- [111] AQUARET. *Case Study - Roosevelt Island Tidal Energy (RITE) Project* (2006, 05/22/10). Available: http://www.wisions.net/files/tr_downloads/Aquaret_Roosevelt_Island.pdf

ANEXO 1

LEVELIZED COST BY TECHNOLOGY GROUP

Conventional Thermal Plants	
Oil Thermal (fuel oil) - 300 MW	0.1397 \$/kWh
Orimulsion Thermal (orimulsion) – 100 MW	0.1030 \$/kWh
Gas Thermal (natural gas) – 100 MW	0.0808 \$/kWh
Pulverized Coal Thermal (coal) – 600 MW	0.0665 \$/kWh
Compression Ignition Engines	
Reciprocating Diesel Engine (diesel, fuel oil) – 50 MW	0.1605 \$/kWh
Reciprocating Orimulsion Engine (orimulsion) – 50 MW	0.1143 \$/kWh
Gas Turbines (oil, natural gas)	
Simple GT – 35 MW	0.0755 \$/kWh
Recuperated GT – 3 MW	0.0739 \$/kWh
Cascaded Humid Air Turbine (CHAT) – 11 MW	0.0804 \$/kWh
Cascaded Humid Air Turbine (CHAT) - 300 MW	0.0584 \$/kWh
Heavy Frame GT – 200 MW	0.0875 \$/kWh
Combined Cycle GT – 500 MW	0.0607 \$/kWh
Advanced Clean Coal	
Atmospheric Circulating Fluidized Bed (ACFB) – 350 MW	0.0682 \$/kWh
Pressurized Fluidized Bed Combustion (PFBC) - 550 MW	0.0642 \$/kWh
Integrated Gasification Combine Cycle - 250 MW	0.0617 \$/kWh
Nuclear Power (uranium)	
Boiling Water Reactor (BWR) Advanced – 1356 MW	0.0869 \$/kWh
Pressurized Water Reactor (PWR) Advanced – 1460 MW	0.0574 \$/kWh
Pressurized Heavy Water Reactor (PHWR) Once Thru – 1330 MW	0.0535 \$/kWh
Advanced Gas-cooled Reactor (AGR) – 1100 MW	0.0545 \$/kWh
Hydro Power	
Large Hydro – 200 MW	0.0949 \$/kWh
Small / Mini Hydro – 30 MW	0.0572 \$/kWh
Micro Hydro – 0.10 MW	0.1484 \$/kWh
Energy Storage	
Pumped Hydro – 1800 MW	0.3442 \$/kWh
Compressed Air Energy Storage (CAES) – 350 MW	0.1222 \$/kWh
Flywheel Storage – 100 MW	3.3012 \$/kWh
USB Lead Acid Storage – 10 MW	0.3206 \$/kWh
USB Advanced Storage – 10 MW	1.1229 \$/kWh
SMES Storage – 100 MW	3.2916 \$/kWh
Ultracapacitors Storage – 1 MW	37.3837 \$/kWh
Geothermal Flashed Steam – 50 MW	0.0754 \$/kWh
Wind Farm – 40 MW	0.0638 \$/kWh
Solar PV – 10 MW	0.2325 \$/kWh
Solar Thermal	
Solar Thermal Trough – 80 MW	0.2099 \$/kWh
Solar Thermal Tower – 200 MW	0.1737 \$/kWh
Solar Thermal Dish + Stirling Engine – 0.5 MW	0.2103 \$/kWh
Fuel Cells	
Phosphoric Acid Fuel Cell (PAFC) – 1 MW	0.1245 \$/kWh
Proton Exchange Member Fuel Cell (PEMFC) – 0.25 MW	0.1048 \$/kWh
Molten Carbonate Fuel Cell (MCFC) – 20 MW	0.1084 \$/kWh
Solid Oxide Fuel Cell (SOFC) – 3 MW	0.0895 \$/kWh
Solid Oxide Fuel Cell + GT Hybrid (SOFC-GT) – 5 MW	0.0954 \$/kWh
Biomass Energy	
Biomass Direct Combustion – 1000 MW	0.0782 \$/kWh
Co-Firing with Coal (20% coal) - 150 MW	0.0387 \$/kWh
Biomass Integrated Gasification Combined Cycle (BIGCC) – 30 MW	0.0572 \$/kWh
Municipal Solid Waste – 100 MW	0.1679 \$/kWh
Land Fill Gas – 3 MW	0.0493 \$/kWh
Sewage Digestion – 1 MW	0.1831 \$/kWh
Ocean Wave – 0.5 MW	0.0447 \$/kWh
Tidal Power – 100 MW	0.2114 \$/kWh

ANEXO 2

EMPRESAS E ORGANIZAÇÕES ENVOLVIDAS DIRECTAMENTE NA PROCURA DE SOLUÇÕES PARA O APROVEITAMENTO DA ENERGIA DAS CORRENTES HIDRODINÂMICAS

Empresa / Organização	País	Tecnologia	Tipo de Tecnologia
Alternative Hydro Solutions Ltd.	Canadá		
Ampair	Reino Unido	Jack Rabbit	
Aquamarine Power	Reino Unido	Neptune	Turbina de Eixo Horizontal
Aquascientific	Reino Unido	Aquascientific Turbine	
Arnold Cooper Hydropower Systems	EUA	OCPS	
Atlantis Resources Corp	Reino Unido	AK, AS e AN Series	Turbina de Eixo Horizontal
Atlantisstrom	Alemanha	Atlantisstrom	Turbina de Eixo Vertical
Balkee Tide and Wave Electricity Generator	Maurícia	TWPEG	Turbina de Eixo Horizontal
Bangladesh Univ. of Engg. & Tech	Bangladesh		
BioPower Systems Pty Ltd	Austrália	bioStream	Lâmina Oscilante
Blue Energy	Canadá	Davis Hydro Turbine / Tidal Fence	Turbina de Eixo Vertical
Bourne Energy	EUA	TidalStar / RiverStar	Turbina de Eixo Horizontal
CADDET Centre for Renewable Energy	Reino Unido		
C-Energy	Holanda		Turbina de Eixo Vertical
Cetus Energy	Austrália	Cetus Turbine	Turbina de Eixo Horizontal
Clean Current	Canadá	Clean Current Tidal Turbine	Turbina de Eixo Horizontal / Venturi
Coastal Hydropower Corporation	Canadá	Ducted Vertical Turbine	Turbina de Eixo Vertical
Crest Energy	Nova Zelândia		
Current Power AB	Suécia		Turbina de Eixo Vertical
Current2Current	Reino Unido	Tidal Turbine	Turbina de Eixo Horizontal
Edinburgh Designs	Reino Unido	variable pitch tidal turbine	Turbina de Eixo Vertical
Edinburgh University	Reino Unido	Polo	Turbina de Eixo Vertical
ESRU - University of Strathclyde	Reino Unido	Contra-Rotating Marine Turbine (CoRMaT)	Turbina de Eixo Horizontal
Fieldstone Tidal Energy	EUA	Fieldstone Tidal Energy	
Firth Tidal Energy	Reino Unido	Sea Caisson & Turbine System (SEACATS)	Turbina de Eixo Horizontal
Free Flow 69	EUA	Osprey	
Free Flow Power Corporation	EUA	SmarTurbine Generator	Turbina de Eixo Horizontal - Venturi
Fri-EI Sea Power	Itália		Conjunto de Turbinas de Eixo Horizontal
Greenheat Systems Ltd	Reino Unido	Gentec Venturi	
Griffith University	Austrália	School of Engineering	
Hales Energy Ltd	Reino Unido	Hales Tidal Turbine	Turbina de Eixo Horizontal
Hammerfest Strom	Noruega	Tidal Stream Turbine	Turbina de Eixo Horizontal
Harbin Engineering University (HEU)	China	Wanxiang Vertical Turbine	Turbina de Eixo Vertical
Hidrocínética Engenharia Ltda (UNB)	Brasil		Turbina de Eixo Horizontal - Canalizada
Hydra Tidal Energy Technology AS (Statkraft)	Noruega	Tidevannskraft	Turbina de Eixo Horizontal
Hydro Green Energy	EUA	Hydrokinetic Turbine	Turbina de Eixo Horizontal - Venturi
Hydro Venturi Ltd.	Reino Unido	Hydro Venturi	
HydroCoil Power, Inc	EUA	HydroCoil	
Hydro-Gen	França	Hydro-gen	
Hydrohelix Energies	França	hydro-helix	
Hydromine	Reino Unido	THE Hydro Mine	
Ing Arvid Nesheim	Noruega	Waterturbine	
Inha University	Coreia do Sul		
Isis Project, Universidade de Oxford	Reino Unido	THAWT (Transverse Horizontal Axis Water Turbine)	
Keys Hydro Power	EUA		Turbina de Eixo Horizontal - Venturi

Kinetic Energy Systems	EUA	Hydrokinetic Generator, KESC Bowsprit Generator, KESC Tidal Generator	Turbina de Eixo Horizontal
Lucid Energy Technologies (GCK Tech)	EUA	Gorlov Helical Turbine (GHT)	Turbina de Eixo Vertical
Lunar Energy	Reino Unido	Rotech Tidal Turbine	Turbina de Eixo Horizontal / Venturi
Marine Current Turbines Ltd	Reino Unido	Seagen, Seaflow	Turbina de Eixo Horizontal
Marlec Engineering	Reino Unido	Amazon Aquacharger™	
Minesto	Suécia	Deep Green Technology	Turbina de Eixo Horizontal - Canalizada
Munich University of Technology	Alemanha		
Natural Currents	EUA	Red Hawk	
Neo-Aerodynamic Ltd Company	EUA	Neo-Aerodynamic	Turbina de Eixo Vertical
Neptune Renewable Energy Ltd	Reino Unido	Proteus e Triton	Turbina de Eixo Vertical
Neptune Systems	Holanda	Tide Current Converter	
New Energy Croporation Inc.	Canada	EnCurrent	Turbina de Eixo Vertical
Nihon University	Japão		
Northern Territory University	Austrália		
Norwegian Ocean Power	Noruega	The Pulsus Turbine	
Ocean Flow Energy Ltd	Reino Unido	Evopod	Turbina de Eixo Horizontal
Ocean Renewable Power Company	EUA	OCGen	
Oceana Energy Company	EUA	TIDES	Turbina de Eixo Horizontal
OpenHydro	Irlanda	Open-Centre Turbine	Turbina de Eixo Horizontal
OPT Ocean Power Technologies Inc.	USA	EEL	
Optimset	Canada	Optimset	
PEEHR	Portugal	PEEHR	Turbina de Eixo Horizontal - Canalizada
Pole Mer Bertagne	França	Marenergie	Turbina de Eixo Horizontal - Canalizada
Ponte di Archimede	Itália	Kobold Turbine	
Pulse Generation Ltd.	Reino Unido	Pulse Hydrofoil	Lâmina Oscilante
QuinetiQ Ltd.	Reino Unido	Cycloidal Turbine	Turbina de Eixo Vertical
Robert Gordon University	Reino Unido	Sea Snail	Turbina de Eixo Horizontal
Rugged Renewables	Reino Unido	Savonius turbine	
Rutten Company	Bélgica		
Sabella	França	Sabella03 e Sabella10	Turbina de Eixo Horizontal
Scotrenewables	Reino Unido	SRTT (Scotrenewables Tidal Turbine)	Turbina de Eixo Horizontal
Sea Power International AB	Suécia	Exim	Turbina de Eixo Vertical
SMD Hydrovision	Reino Unido	TiDEL	Turbina de Eixo Horizontal
Starfish Electronics Ltd	Reino Unido	StarTider	Turbina de Eixo Horizontal
Sudan (Supported by ITDG)	Reino Unido	ITDG-Guba	
Swanturbines Ltd.	Reino Unido	Swan Turbine	Turbina de Eixo Horizontal
Teamwork Tech.	Holanda	Torcado	Turbina de Eixo Horizontal
The Engineering Business Ltd.	Reino Unido	Stringray	Lâmina Oscilante
Thropton Energy Services	Reino Unido	Thropton Turbine	
Tidal Electric	Reino Unido \ EUA	Tidal Lagoons	
Tidal Energy Ltd	Reino Unido	Delta Stream	Turbina de Eixo Horizontal
Tidal Energy Pty Ltd	Austrália	DHV Turbine	Turbina de Eixo Vertical
Tidal Generation Ltd.	Reino Unido	DEEP-Gen	Turbina de Eixo Horizontal
Tidal Hydraulic Generators Ltd.	Reino Unido	Tidal Hydraulic Generator (THG)	Turbina de Eixo Horizontal
Tidal Sails	Noruega	Tidal Sails AS / Harmonica	
Tidal Stream	Reino Unido	Tidal Stream Turbine	Turbina de Eixo Horizontal
Tideng	Alemanha	Tideng	Turbina de Eixo Horizontal
Tocado BV	Holanda	Tocado Turbines	Turbina de Eixo Horizontal

Transverpello	Alemanha		
Tyson Turbine	Austrália		
UEK Corporation	EUA	Underwater Electric Kite	Lâmina Oscilante
UNAM Engineering Institute	México	Impulsa Turbine	Turbina de Eixo Vertical
University College London	Reino Unido		
University of British Columbia	Canada		
University of Manitoba	Canada		
University of Southampton	Reino Unido	Southampton Integrated Tidal Generator	Turbina de Eixo Horizontal
Verdant Power	EUA	Free Flow System	Turbina de Eixo Horizontal
Verderg	Reino Unido	Spectral Marine Energy Converter	
Voith Hydro	Alemanha	hyTide	Turbina de Eixo Horizontal
Vortex Hydro Energy	EUA	VIVACE (Vortex Induced Vibrations Aquatic Clean Energy)	
Warrior Girl Corporation	EUA	Vertical Axis Venturi System	Turbina de Eixo Vertical
Water Power Industries	Noruega	WPI Turbine	
Water Wall Turbine	EUA	WWTurbine	
Wild Water Power	Canada		
Woodshed Technologies - CleanTechCom Ltd	Austrália/Reino Unido	Tidal Delay	
ZOTLOETERER	Áustria	Gravitation water vortex power plant	

ANEXO 3

MAPAS DO ESTUÁRIO INFERIOR E MÉDIO DO RIO DOURO

