

Modelação da dispersão de efluentes de centrais termoeléctricas em zonas costeiras: exemplos de aplicação

A.B. Fortunato¹, L. Pinto², M. Rodrigues², A. Oliveira² e A. Azevedo²

¹Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Departamento de Hidráulica e Ambiente, Av. do Brasil, 101, 1700-066, Lisboa, Portugal

email: afortunato@lnec.pt <http://www.lnec.pt>

²Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Departamento de Hidráulica e Ambiente, Av. do Brasil, 101, 1700-066, Lisboa, Portugal

Sumário

As centrais termoeléctricas são frequentemente construídas em zonas costeiras de forma a utilizarem a água do mar para arrefecimento. Esta água é captada junto à costa, e rejeitada numa zona próxima a temperaturas mais elevadas em cerca de 10°C. No entanto, é necessário definir soluções para a tomada e a rejeição de água que evitem curto-circuitos térmicos.

Descreve-se a análise de várias soluções propostas para três centrais termoeléctricas com caudais de água para arrefecimento muito distintos, através da aplicação de um modelo hidrodinâmico tri-dimensional baroclínico. Focam-se em particular aspectos relacionados com o estabelecimento do modelo, a calibração e a análise dos resultados.

Palavras chave: pluma térmica, modelação numérica, estratificação

1 Introdução

As centrais termoeléctricas requerem frequentemente caudais de água para arrefecimento muito elevados. É por isso frequente serem construídas em zonas costeiras, de modo a tirar partido da disponibilidade de água aí existente. Esta água é assim captada junto à costa, e rejeitada numa zona próxima a temperaturas mais elevadas em cerca de 10°C. No entanto, a eficiência energética do processo requer que não ocorram curto-circuitos térmicos, i.e., que a água quente proveniente da rejeição não volte a ser captada pela central. Para tal, é necessário desenvolver e testar soluções adequadas para a tomada e a rejeição de água.

A dispersão de uma pluma térmica em zonas costeiras envolve agentes dinâmicos distintos (marés e ventos) e vários processos físicos (advecção, difusão, estratificação). A sua simulação requer por isso modelos sofisticados. A aplicação destes modelos é também dificultada, nos casos em análise, pela escassez de dados. A presente comunicação resume os estudos efectuados no Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) para três centrais termoeléctricas previstas para o Reino de Marrocos (Cap Rhir, Tarfaya e Bir el Har) utilizando o modelo ELCIRC [1].

O artigo está organizado em três secções para além desta introdução. Primeiro, descreve-se o estabelecimento do modelo utilizado, incluindo os requisitos para o modelo e uma breve descrição do modelo, os dados, as condições de fronteira, e a validação do modelo. Na secção 3 analisam-se os resultados, nomeadamente no que se refere à importância da estratificação, soluções para evitar curto-circuitos térmicos e avaliação crítica da legislação ambiental. O artigo termina com uma breve síntese.

2 Aplicação do modelo

2.1 Descrição do modelo

A simulação da dispersão de plumas térmicas impõe requisitos severos ao modelo a aplicar, quer do ponto de vista físico, quer do ponto de vista numérico.

Do ponto de vista físico, estas plumas tendem naturalmente a ficar estratificadas devido às grandes diferenças de temperatura entre a água na rejeição e a água ambiente. Assim, o modelo a aplicar terá de ser tri-dimensional e baroclínico (i.e., ter em conta os gradientes de pressão devidos às diferenças de densidade no cálculo do escoamento). O modelo deverá também incorporar um fecho de turbulência relativamente sofisticado, que tenha em consideração o efeito da estratificação na redução do coeficiente de viscosidade. Caso contrário, não poderá representar correctamente os processos de mistura vertical que são fundamentais para o comportamento da

pluma. Ora, sendo o vento o principal responsável pela circulação costeira, as velocidades são muito variáveis ao longo da vertical. A posição da pluma na vertical tem por isso uma importância fundamental, também, no seu movimento na horizontal. O modelo deverá ainda ter em consideração as trocas térmicas entre a atmosfera e o oceano de forma a representar correctamente o arrefecimento progressivo da pluma.

De um ponto de vista numérico, os requisitos do modelo estão relacionados com as escalas espaciais e temporais relevantes. Em termos espaciais, a representação correcta do campo próximo requer uma resolução horizontal muito fina. Assim, o caderno de encargos dos presentes estudos impunha uma resolução mínima de 10 m na zona de descarga. Simultaneamente, a representação da hidrodinâmica na zona envolvente implica domínios da ordem de várias dezenas de quilómetros. Esta diferença de escalas implica a utilização de malhas encaixadas, ou, como era imposto no caderno de encargos, de malhas não-estruturadas. Em termos temporais, a experiência mostrou que é necessário simular períodos de várias semanas para se atingir um equilíbrio dinâmico. Nestas condições, é fundamental que o modelo seja muito eficiente para permitir efectuar as dezenas de testes necessários.

Dados estes requisitos, optou-se pelo modelo ELCIRC [1]. Este modelo calcula a elevação da superfície livre, as três componentes da velocidade, a salinidade e a temperatura, através de um conjunto de seis equações hidrodinâmicas (equações 1 a 6) assumindo as aproximações de Boussinesq e hidrostática. A equação de estado é utilizada para calcular a massa específica através da salinidade, temperatura e pressão hidrostática.

As equações resolvidas neste modelo são estabelecidas por aplicação dos princípios de conservação de massa, de quantidade de movimento, de conservação de massa de sal e de calor, e são escritas da seguinte forma:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \int_{H_R-h}^{H_R+\eta} u dz + \frac{\partial}{\partial y} \int_{H_R-h}^{H_R+\eta} v dz = 0 \quad (2)$$

$$\frac{Du}{Dt} = fv - \frac{\partial}{\partial x} \left[g(\eta - \alpha\psi) + \frac{P_a}{\rho_0} \right] - \frac{g}{\rho_0} \int_z^{H_R+\eta} \frac{\partial \rho}{\partial x} dz + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{mv} \frac{\partial u}{\partial z} \right) + F_{mx} \quad (3)$$

$$\frac{Dv}{Dt} = -fu - \frac{\partial}{\partial y} \left[g(\eta - \alpha\psi) + \frac{P_a}{\rho_0} \right] - \frac{g}{\rho_0} \int_z^{H_R+\eta} \frac{\partial \rho}{\partial y} dz + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{mv} \frac{\partial v}{\partial z} \right) + F_{my} \quad (4)$$

$$\frac{DS}{Dt} = \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{sv} \frac{\partial S}{\partial z} \right) + F_s \quad (5)$$

$$\frac{DT}{Dt} = \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{hv} \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \frac{\dot{Q}}{\rho_0 C_p} + F_h \quad (6)$$

onde H_R é a coordenada z para o nível de referência (geóide ou nível médio do mar); $h(x, y)$ é a profundidade da água medida a partir da superfície da água não perturbada de forma que $H(x, y, t) = h(x, y) + \eta(x, y, t)$ seja a profundidade total da água; ψ é o potencial de maré; α é o factor efectivo de elasticidade da Terra (0,69); $\rho(x, y, z, t)$ é a massa específica da água; S é a salinidade da água; T é a temperatura da água; K_{mv} , K_{sv} e K_{hv} são os coeficientes de difusão turbulenta vertical para a quantidade de movimento, o sal e o calor, respectivamente; F_s e F_h são os termos de difusão horizontal para as equações de transporte; F_{mx} e F_{my} são os termos de difusão horizontal para as equações de quantidade de movimento; $\dot{Q}(\lambda, \phi, z, t)$ é a taxa de absorção da

radiação solar; C_p é o calor específico da água. O atrito de fundo é representado por uma formulação quadrática convencional.

A discretização temporal das equações é efectuada através de um esquema semi-implícito: o gradiente de pressão barotrópico na equação da quantidade de movimento e o termo de fluxo na equação de continuidade são tratados semi-implicitamente; o termo de difusão turbulenta vertical e as condições de fronteira de fundo para as equações da quantidade de movimento são tratados implicitamente; e os restantes termos são tratados explicitamente.

O ELCIRC utiliza um sistema de coordenadas cartesianas (x,y,z) . A vertical é discretizada com coordenadas z , numa série de camadas não uniformes que se estendem ao longo de todo o domínio horizontal. O domínio horizontal (x,y) é coberto por uma malha não estruturada formada por elementos triangulares ou quadrangulares.

2.2 Aplicação do modelo

Foram estudados três locais na costa marroquina para a implantação de três centrais (Fig. 1). Em todos os casos dispunha-se de levantamentos batimétricos pormenorizados numa área restrita em frente da central prevista, enquanto as batimetrias das zonas adjacentes foram retiradas de cartas náuticas. Os domínios de estudo foram inicialmente definidos como zonas semi-circulares com cerca de 30 km de raio (Fig. 2a). Num dos locais (Cap Rhir), verificou-se que o domínio levava a campos de velocidades irrealistas para ventos perpendiculares à costa, pelo que foi necessário aumentar significativamente o domínio de cálculo (Fig. 2b).

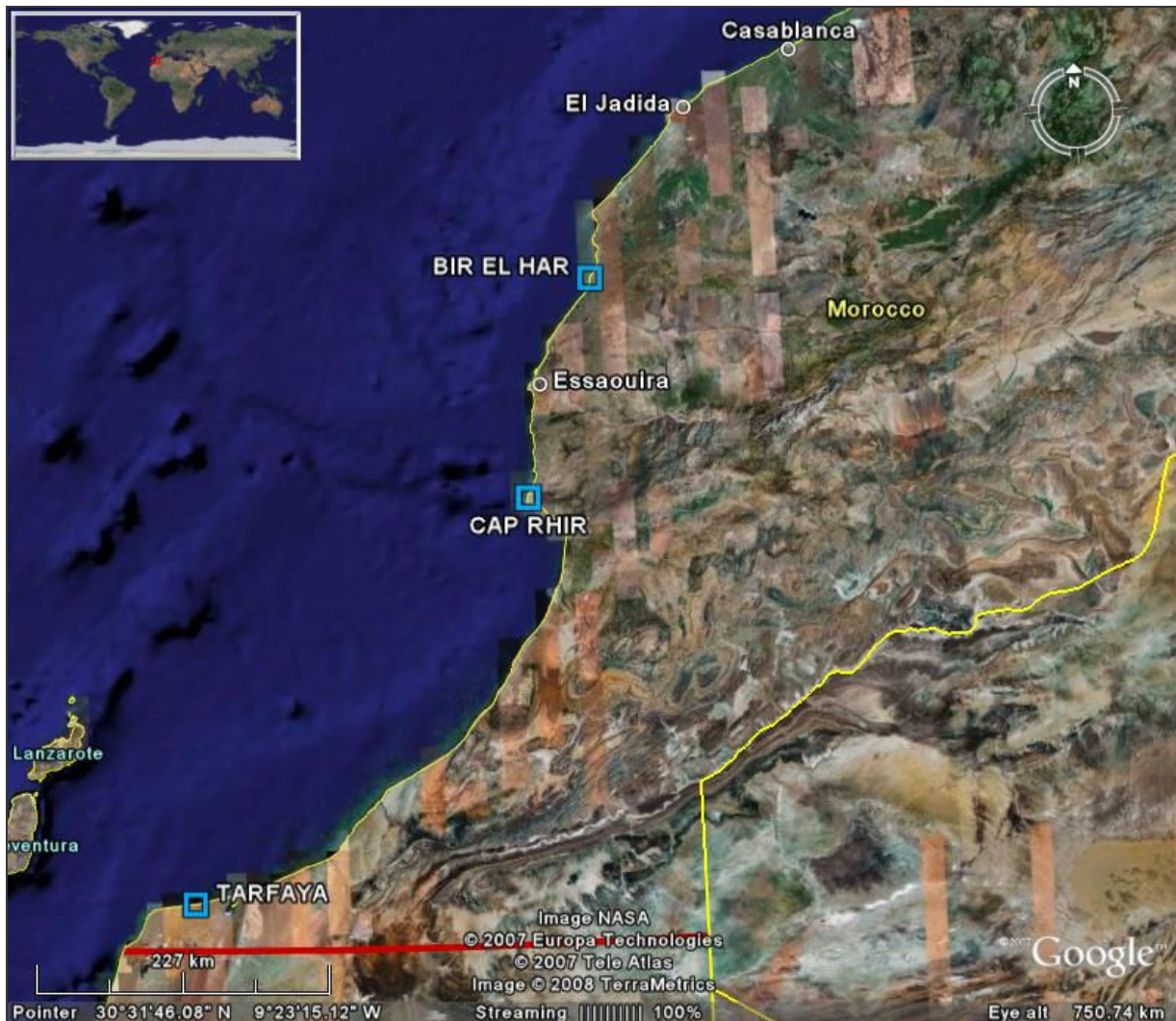


Fig.1. Zonas de estudo. As centrais previstas terão os seguintes caudais de arrefecimento: Bir el Har: 222 m³/s; Cap Rhir: 44 m³/s; Tarfaya: 1 m³/s. Fonte: Google Earth.

As malhas horizontais foram geradas de forma semi-automática com o software Xmgredit [2]. Foi imposto um espaçamento de cerca de 10 m na zona de descarga, aumentando progressivamente até 3 km junto à fronteira

oceânica. Na vertical utilizaram-se espaçamentos de 0,5 m até 10 m de profundidade, e espaçamentos crescentes abaixo desta profundidade.

O modelo foi forçado pela maré, pelo vento e pela radiação solar. O modelo requer ainda informação sobre outros parâmetros atmosféricos (temperatura do ar, pressão atmosférica, humidade específica e nebulosidade). Os níveis de maré foram especificados através dos resultados de um modelo regional de maré que cobre as costas atlânticas de Marrocos, Portugal, Espanha e França, e que reproduz os níveis com erros centimétricos [3]. O vento e os parâmetros atmosféricos foram definidos geralmente com base em previsões de modelos atmosféricos (<http://www.windguru.cz>, <http://wunderground.com>), excepto quando havia medições em locais próximos. Estes resultados são disponibilizados com resoluções muito grosseiras, o que limita a precisão dos modelos. Por exemplo, as séries temporais de ventos disponíveis dos modelos atmosféricos têm um intervalo temporal de 3 horas ou superior, e são discretizados em apenas 16 rumos. Num dos locais (Tarfaya) utilizaram-se dados de vento determinados por detecção remota (<http://podaac.jpl.nasa.gov/ovw/index.html>), apesar de apenas existirem dois valores diários. As condições iniciais e de fronteira para a temperatura foram obtidas através de dados climatológicos. A radiação solar foi calculada com base na formulação apresentada em Portela e Neves [4].

A humidade específica é calculada com base na formulação apresentada em <http://www.cactus2000.de>, sendo dada por:

$$q = \frac{x_{H_2O} \cdot M_{H_2O}}{x_{H_2O} \cdot M_{H_2O} + (1 - x_{H_2O}) \cdot M_{ar_seco}} \quad (7)$$

onde q é a humidade específica (kg/kg), x_{H_2O} é a fracção molar da água na mistura, M_{H_2O} é a massa molar da água (g/mol) e M_{ar_seco} é a massa molar do ar seco (g/mol). A razão de mistura no ar seco é determinada a partir da pressão atmosférica e da humidade relativa [5].

O fecho de turbulência foi seleccionado após uma análise de sensibilidade, tendo sido escolhido o modelo de 2,5 equações de Mellor e Yamada [6] com as alterações propostas por Galperin et al. [7].

Finalmente, e dado que o modelo ELCIRC não é condicionado pelo número de Courant barotrópico, podem ser utilizados passos de cálculo elevados, em geral da ordem dos minutos. Após uma análise de sensibilidade, foi escolhido um passo de cálculo de 30 s por condicionamentos do modelo de trocas de calor com a atmosfera. Passos de cálculo superiores revelaram o aparecimento de algumas oscilações numéricas.

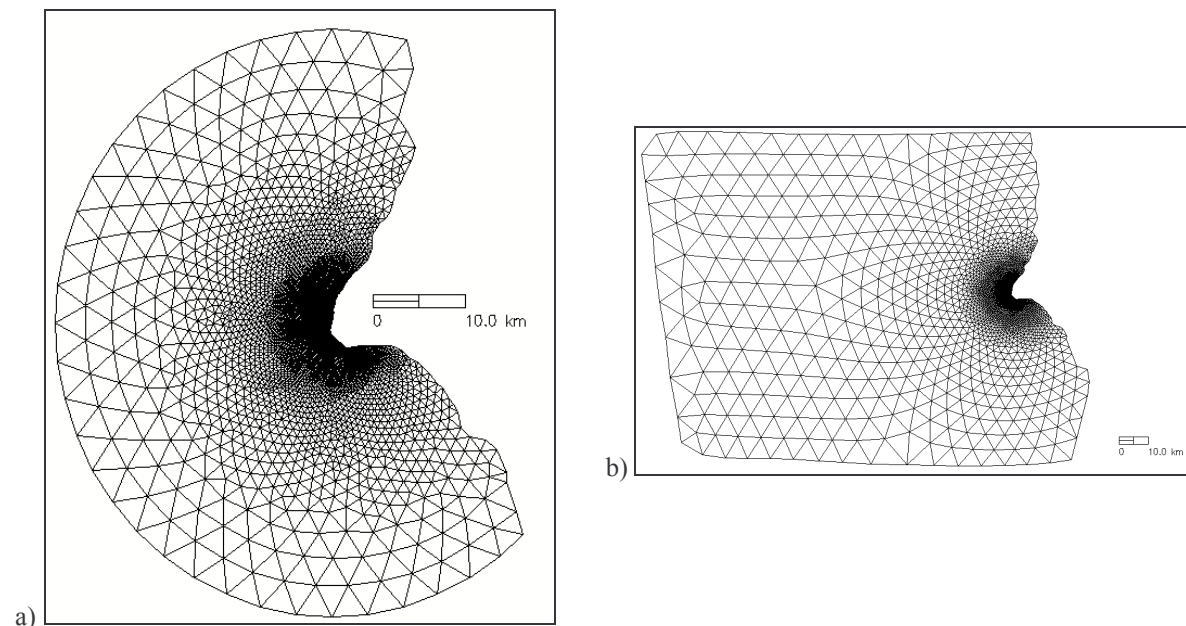


Fig.2. Malhas para Cap Rhir: a) malha inicial; b) malha para ventos perpendiculares à costa.

2.3 Calibração e validação do modelo

A calibração do modelo foi efectuada com base nos dados disponíveis, nomeadamente níveis de maré e velocidades e temperaturas em dois pontos na coluna de água, para cada um dos casos de estudo. Dado que os níveis de maré são essencialmente determinados pelas condições de fronteira, e não pela propagação da maré no interior do domínio, a precisão com que são reproduzidos depende quase exclusivamente da precisão do modelo regional utilizado para forçar o modelo local. Neste caso, obtiveram-se erros da ordem dos centímetros.

As velocidades dependem sobretudo das condições de vento impostas e do fecho de turbulência seleccionado. O fecho de turbulência foi escolhido com base nas simulações para Cap Rhir e mantido inalterado para os outros casos. No caso do vento, foram feitas análises de sensibilidade aos dados utilizados para forçar o modelo, à forma como os dados eram interpolados no tempo e ao coeficiente de arrastamento entre o ar e a água. Globalmente, verificou-se alguma dificuldade em representar correctamente as velocidades. Atribuiu-se esta dificuldade à grande sensibilidade das velocidades ao vento, e aos grandes erros com que o seu valor é conhecido. Nos casos em que são utilizados dados de vento, estes são medidos em terra, onde pode haver diferenças significativas em relação ao que se passa sobre o mar. Nos casos em que são utilizados resultados de modelos atmosféricos, observaram-se por vezes comportamentos inconsistentes com os dados de campo. Por outro lado, as próprias medições das velocidades envolvem erros significativos. A Fig. 3 ilustra a precisão conseguida quer para a velocidade quer para a temperatura.

Em geral, as temperaturas são sensíveis a vários factores: radiação solar, temperatura do ar, humidade específica, nebulosidade e vento. No presente estudo, dada a limitada dimensão dos domínios, as condições de fronteira são também importantes. Nestas condições, e uma vez que não se dispunha de dados junto às fronteiras mas apenas informação climatológica, foi necessário ajustar as temperaturas nas fronteiras em 1 a 2 graus para reproduzir as temperaturas observadas. As diferenças de temperatura observadas podem dever-se a limitações nos forçamentos utilizados como parâmetros atmosféricos. Estes parâmetros determinam as trocas de calor entre a coluna de água e a atmosfera, pelo que afectam a temperatura da água. Análises de sensibilidade à radiação solar incidente e à humidade relativa do ar revelaram diferenças significativas, da ordem de 0,5-1 °C, nos resultados das temperaturas simuladas. Espera-se por isso que as discrepâncias entre o modelo e os dados decorram em grande parte de erros nos parâmetros atmosféricos. O facto de se utilizarem condições de fronteira provenientes de climatologia contribui também certamente para estas discrepâncias.

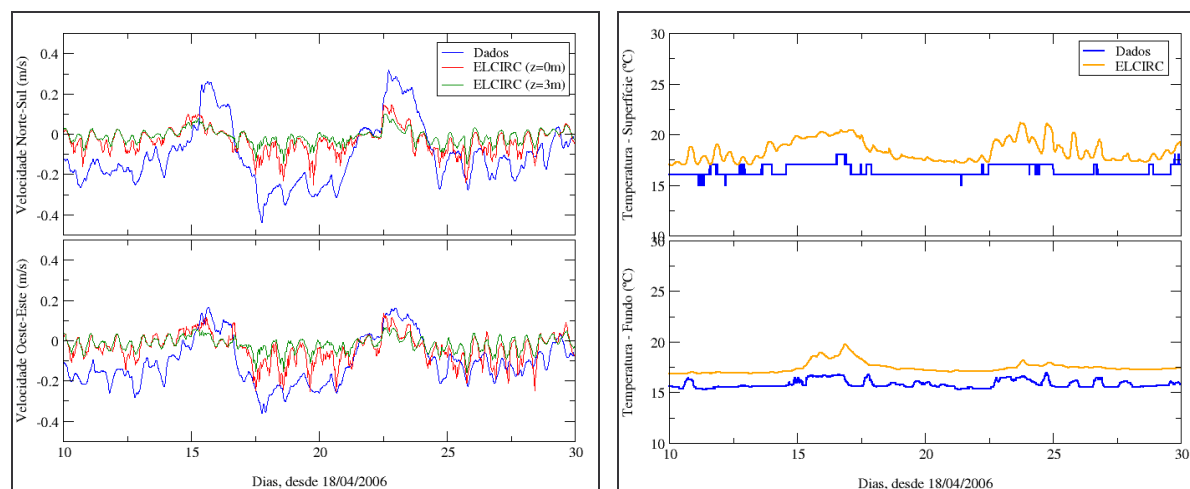


Fig.3. Exemplos de resultados de validação em Bir el Har: velocidades (esquerda) e temperaturas (direita).

3 Resultados e discussão

3.1 Caracterização da situação actual

Uma vez calibrado e validado, o modelo foi utilizado para caracterizar o escoamento nas zonas de estudo para quatro situações de vento características: um vento de noroeste de baixa intensidade, um vento de norte com intensidade moderada, um vento com variabilidade diurna e um vento forte de sul. Esta caracterização permitiu uma primeira definição da localização relativa dos locais de tomada de água e de rejeição de água. Por exemplo, os resultados mostram que as velocidades residuais são dirigidas principalmente para Sul (Fig. 4), o que se explica pelas direcções predominantes do vento na região. Nestas condições, é conveniente localizar as tomadas de água a Norte das rejeições.

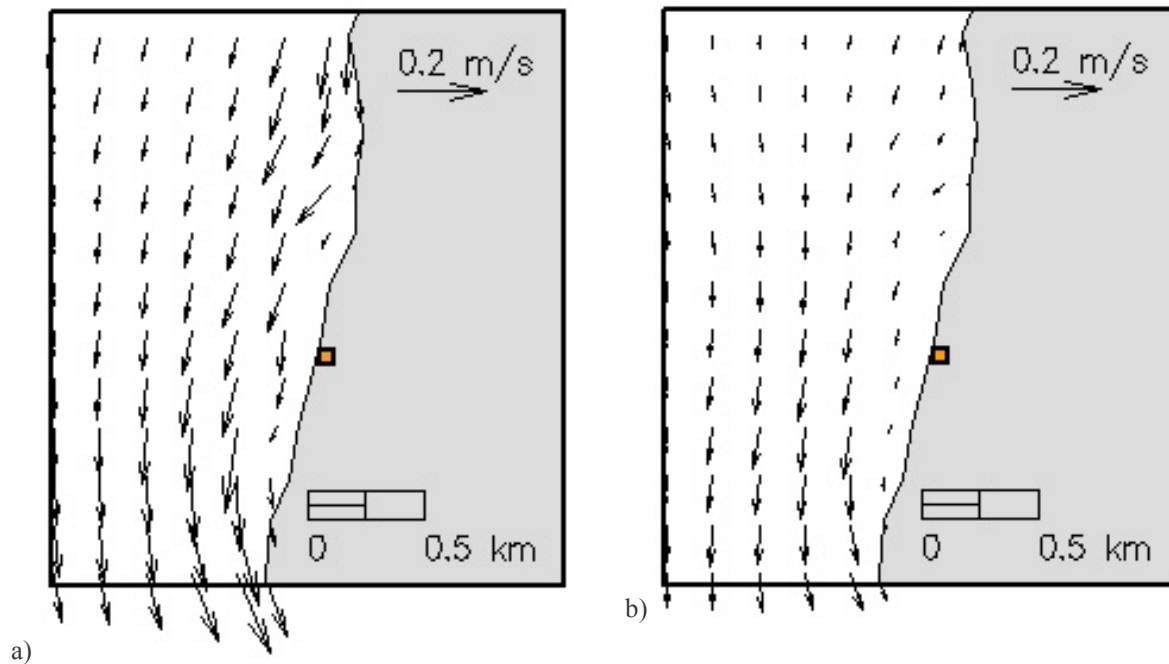


Fig.4. Exemplos de velocidades residuais médias na vertical em Cap Rhir (valores interpolados numa malha regular grosseira): a) vento de Norte de 14 nós; b) vento variável no tempo. O quadrado a laranja representa a localização da central.

3.2 Comportamento das plumas térmicas

Os resultados mostram que as soluções mais adequadas dependem em larga medida do caudal da central. Para caudais baixos (Tarfaya), a pluma é muito pequena. Nestas condições, a recirculação térmica não é determinante para a escolha da solução (Fig. 5a). Pelo contrário, para caudais muito elevados, a pluma tem uma grande extensão e a maioria das soluções não são satisfatórias em todas as condições de vento simuladas. Podem ocorrer frequentemente recirculações térmicas, que põem em causa a validade da solução (Fig. 5b). Para situações destas, são necessárias soluções elaboradas, que tirem partido do comportamento da pluma. Por exemplo, pode-se tirar partido da necessidade de construir um porto para receber o carvão necessário para o funcionamento das centrais. Com efeito, o quebra-mar do porto altera a circulação, podendo afastar a pluma para o largo, se a rejeição for convenientemente localizada (Fig. 5c). No entanto, é necessário ter em atenção que o porto pode ele próprio reter a água quente proveniente da central, o que pode dificultar a localização das tomadas de água no seu interior (Fig. 5d).

Os resultados mostram ainda que a pluma se tende a concentrar na dezena de metros superficiais (Fig. 6). Este comportamento permite reduzir a circulação térmica captando a água para arrefecimento a profundidades mais elevadas.

Finalmente, há que referir que existe legislação a nível mundial que impõe restrições relativas ao aumento de temperatura devido a descargas térmicas. Por exemplo, na União Europeia impõe-se que o aumento de temperatura induzido pelas descargas não deve ser superior a 3°C a 100 m da descarga. As simulações efectuadas mostram que o cumprimento desta legislação para caudais da ordem de grandeza dos previstos para Bir el Har se afigura virtualmente impossível (Fig. 7). Com efeito, a pluma estende-se ao longo de vários quilómetros. Uma conclusão semelhante foi já avançada por [8]. O facto de a pluma se concentrar à superfície vem no entanto mitigar os impactes ambientais, uma vez que não irá afectar os organismos bentónicos.

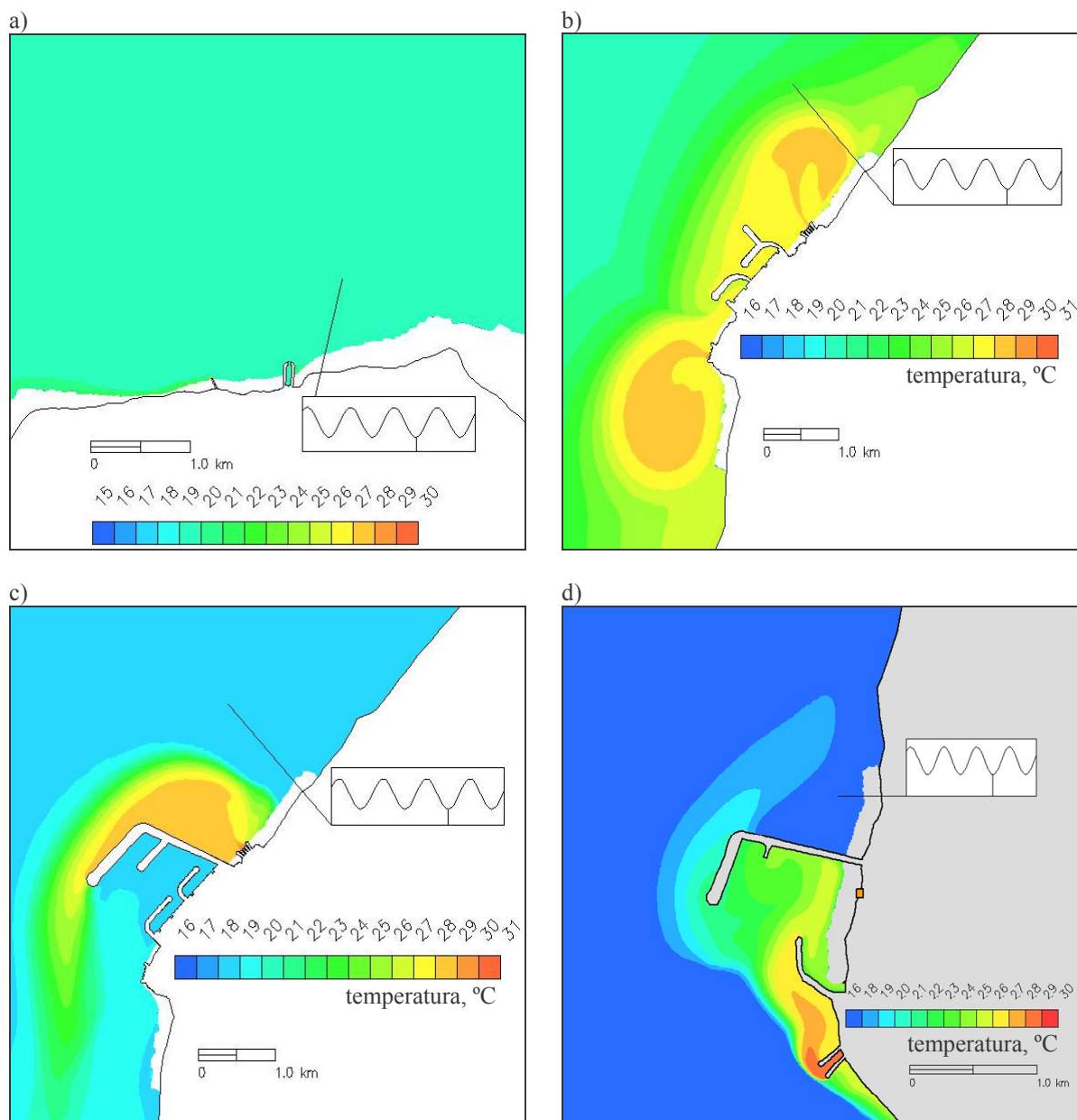


Fig.5. Exemplos de plumas térmicas à superfície: a) Tarfaya, para um vento de NE, e uma rejeição a Oeste da tomada de água; b) Bir el Har, para um vento de NW, e uma solução com rejeições a Norte e a Sul das tomadas de água; c) Bir el, para um vento de N, e uma solução que envolve a construção de um porto, cujo quebra-mar afasta a pluma para o largo; d) Cap Rhir, para um vento de SW, rejeição a Sul do porto e tomada no interior deste.

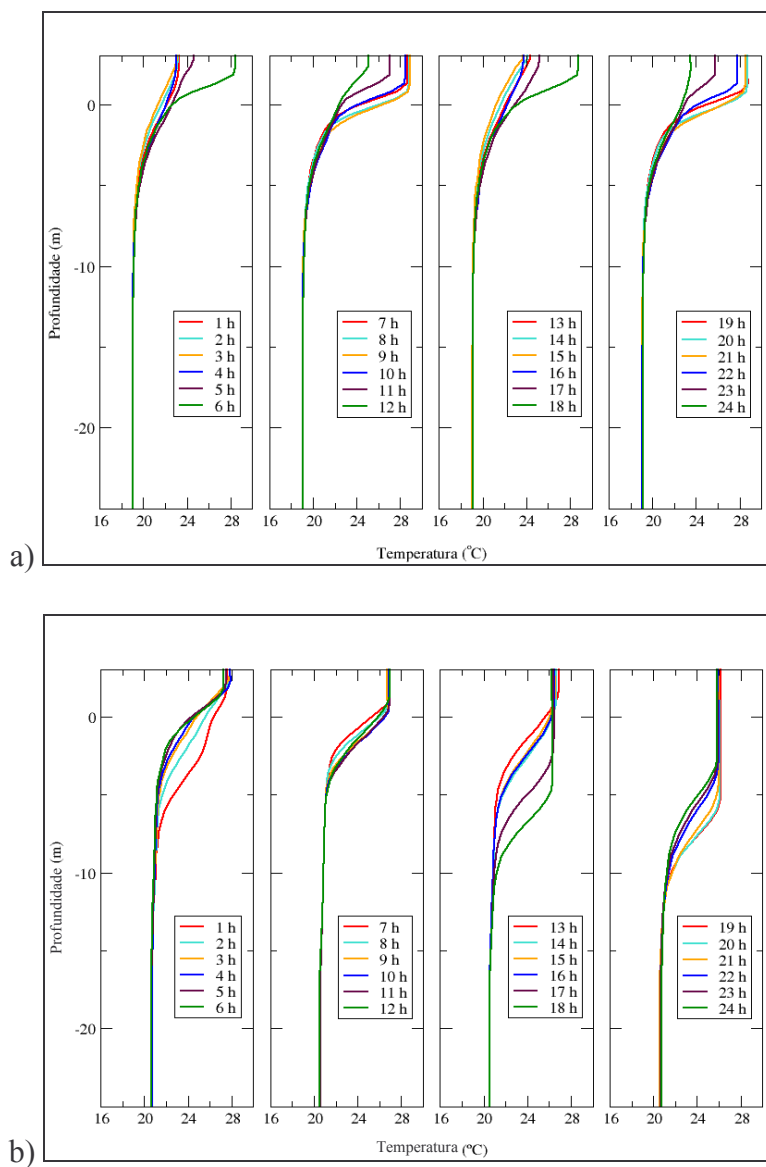


Fig.6. Exemplos de perfis verticais de temperatura na zona afectada pela pluma, para ventos variáveis no tempo:
a) Cap Rhir; b) Bir el Har.

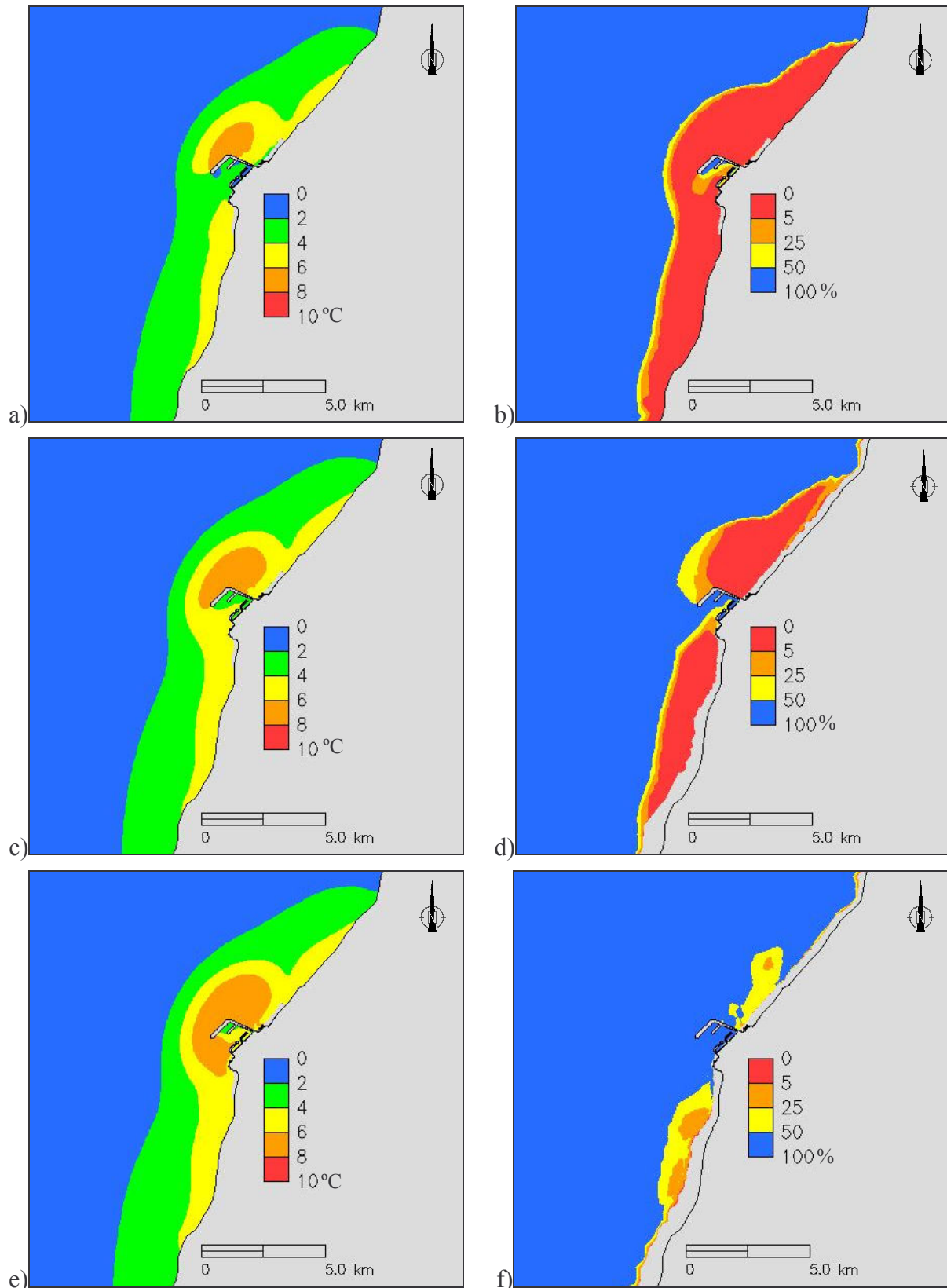


Fig.7. Exemplo de diferenças de temperatura entre uma das soluções ensaiadas em Bir el Har e a situação actual para um vento de NW: a) mínimo; c) média; e) máximo. Percentagem do tempo durante o qual as diferenças de temperatura são inferiores a 3°C : b) à superfície; d) a -2.5 m ; f) a -5 m ZH.

4 Conclusões

Resumiu-se nesta comunicação um conjunto de estudos em modelo matemático para testar soluções para a rejeição de efluentes térmicos em três centrais a construir na costa marroquina. Os estudos consistiram na aplicação, calibração, validação e exploração de um modelo baroclínico tri-dimensional baseado em malhas não-estruturadas para escoamentos costeiros e oceânicos.

A experiência sugere que a principal dificuldade neste tipo de estudos reside actualmente na disponibilidade de dados quer para forçar o modelo, quer para o calibrar. Os dados existentes para forçar os modelos são de qualidade limitada, com baixa resolução espacial e temporal. Do lado positivo, é de salientar que estão disponíveis dados de modelos globais e regionais que permitem efectuar este tipo de estudo em qualquer parte do mundo de forma expedita. Apesar desta dificuldade, a utilização de modelos numéricos afigura-se como imprescindível para testar e afinar soluções.

Os resultados mostram que para caudais de arrefecimento muito elevados, como é o caso de Bir el Har ($222 \text{ m}^3/\text{s}$), é muito difícil evitar completamente a recirculação de parte da água aquecida para a tomada de água.

Agradecimentos

As soluções apresentadas foram desenvolvidas na Hidroprojecto, S.A. pelos Eng.^{os} Mário Teles, Sofia Freire e Breno Ribeiro e pela Dr.^a Andreia Barata. Agradece-se a disponibilização do modelo ELCIRC e do software utilizado para gerar as figuras 2, 4, 5 e 7 pelos Profs. Joseph Zhang e António Melo Baptista, do *Science and Technology Center for Coastal Margin Observation and Prediction* (E.U.A.). Este trabalho foi parcialmente financiado pela Fundação Luso-Americana para o Desenvolvimento, no âmbito do projecto “*Towards a Nowcast-Forecast System for Estuarine and Coastal Water Quality*”.

Referências

1. Zhang, Y., A.M. Baptista e E.P. Myers, A cross-scale model for 3D baroclinic circulation in estuary-plume-shelf systems: I. Formulation and skill assessment, *Continental Shelf Research*, 24(18) 2187-2214, 2004.
2. Turner, P. e A.M. Baptista. ACE/gredit *User's Manual. Software for Semi-automatic Generation of Two-Dimensional Finite Element Grids*. Center for Coastal and Land-Margin Research, Oregon Graduate Institute of Science & Technology, 1993.
3. Fortunato, A.B., L. Pinto, A. Oliveira e J.S. Ferreira, Tidally-generated Shelf Waves off the Western Iberian Coast, *Continental Shelf Research*, 22(14) 1935-1950, 2002.
4. Portela, L.I. e Neves, R., Modelling temperature distribution in the shallow Tejo estuary, *2nd European Conf. on Advances in Water Resources Technology and Management*, 457-463, 1994.
5. Lowe, P.R. e Ficke, J.M. *The computation of saturation vapor pressure*. Tech. Paper N. 4-74, Environmental Prediction Research Facility, Naval Postgraduate School, Monterey, CA, 27 pp, 1974.
6. Mellor, G.L. e Yamada, T., Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems, *Reviews in Geophysics*, 20, 851-875, 1982.
7. Galperin, B., Kantha, L.H., Hassid e S., Rosati, A., A quasi-equilibrium turbulent energy model for geophysical flows. *Journal of Atmospheric Science*, 45: 55-62, 1988.
8. Kolluru, V.S., E.M. Buchak e P.E. Brinkmann, Hydrodynamic modeling of coastal LNG cooling water discharge. *Journal of Energy Engineering*, 129(1), 16-31, 2003.