

FERRAMENTA PARA A OTIMIZAÇÃO E GESTÃO DE RISCOS NOS PROJECTOS DE EMISSÁRIOS SUBMARINOS: APLICAÇÃO A UM CASO DE ESTUDO EM PORTUGAL.

A. Mendonça¹, S. Solari², M.A. Losada³, M.G. Neves⁴ and M.T. Reis⁵

Resumo

Neste estudo apresenta-se uma metodologia de avaliação de riscos para estados limites operativos no projecto de emissários submarinos que considera: a natureza intrínseca da estrutura, a legislação ambiental Europeia em vigor, os agentes climáticos característicos da zona costeira e a previsão do comportamento da pluma a longo-prazo.

Pretende-se ainda identificar alguns padrões principais do comportamento da pluma e a sua relação com os agentes forçadores locais: vento e maré. Esses padrões são obtidos para a região de Albufeira, onde se encontra o emissário de Vale de Faro, utilizando o método das funções ortogonais empíricas. A probabilidade de falha operativa ou paragem é considerada no dimensionamento probabilístico da estrutura.

Com o presente estudo pretende-se estabelecer uma metodologia consistente para a optimização e gestão de riscos no projecto de emissários submarinos com base nas Recomendações Espanholas para Estruturas Marítimas, ROM, actualmente de aplicação essencialmente a portos e estruturas costeiras (Puertos del Estado, 2002). Esta metodologia permite avaliar a segurança e operatividade de emissários submarinos e será parte integrante da ferramenta, em desenvolvimento, para a optimização e gestão de riscos nos projectos de emissários submarinos.

1 Introdução

O uso de emissários submarinos tem vindo a aumentar rapidamente (Grace, 2009) e as suas boas condições de trabalho são de importância obrigatória para o meio ambiente, bem-estar das populações e da economia. Estas estruturas estão sujeitas à ação de vários agentes climáticos, têm diversos tipos de uso e deverão cumprir os critérios de segurança global e de operatividade.

Apesar dos projetos de emissários submarinos serem complexos, de alto custo e multidisciplinares, a gestão de risco nestes projectos é ainda aplicada instintivamente, com riscos que permanecem implícitos. Este trabalho tem como objetivo criar uma metodologia consistente para a gestão de riscos no projeto de emissários submarinos seguindo o procedimento desenvolvido nas Recomendações Espanholas para Estruturas Marítimas, ROM, que é restrito, essencialmente, a portos e estruturas de proteção costeira (Puertos del Estado, 2002). Esta metodologia permite avaliar a segurança e operacionalidade, bem como alguns aspetos do desempenho de emissários submarinos.

Os valores extremos da maioria dos agentes climáticos, num dado intervalo de tempo, são acontecimentos raros, que devem ser quantificados, variando também consideravelmente no espaço. A ocorrência e a magnitude, ou valor, dos factores de projecto são incertos em termos espaciais e temporais, e uma maneira dos considerar é através da aplicação da teoria da probabilidade.

Após esta introdução, segue-se a secção 2 de descrição da metodologia, a secção 3 onde se descreve a natureza intrínseca dos emissários e a secção 4 sobre o impacto do efluente no

¹ LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Av. do Brasil, 101, 1700-066 Lisboa, Portugal. amendonca@lnec.pt

² Universidade de Granada, CEAMA, Av. del Mediterráneo s/n, 18006 Granada, Espanha. mlosada@ugr.es

³ LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Av. do Brasil, 101, 1700-066 Lisboa, Portugal. gneves@lnec.pt

⁴ LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Av. do Brasil, 101, 1700-066 Lisboa, Portugal. treis@lnec.pt

⁵ LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Av. do Brasil, 101, 1700-066 Lisboa, Portugal. treis@lnec.pt

meio. Na secção 5 apresenta-se a metodologia de simulação dos agentes climáticos, na secção 6 descreve-se o modelo numerico utilizado e na secção 7 a aplicação das funções ortogonais empíricas. Finalmente, na secção 8 apresenta-se o caso de estudo e na secção 9 analisam-se os resultados, seguidos das conclusões na secção 10.

2 Metodologia

As alternativas de projecto para emissários submarinos deverão ser elaboradas com base na análise de soluções suficientemente flexíveis de modo a que possam ser constantemente atualizadas e melhoradas, a fim de serem cumpridos os requisitos de proteção ambiental indicados na Directiva-Quadro 'Estratégia Marinha' e os níveis de operacionalidade estabelecidos no projeto.

O primeiro passo da metodologia desenvolvida especifica os requisitos e níveis alvo de concepção destas estruturas na fase de projecto e está descrito em Mendonça et al. (2013), juntamente com os modos de falha e os estados-limite correspondentes para os emissários submarinos. O procedimento para o cálculo dos níveis-alvo determina se um projecto satisfaz os requisitos de segurança, manutenção e exploração para os níveis recomendados de fiabilidade, funcionalidade e operacionalidade durante todas as fases do projecto (Losada e Benedicto, 2005). Este procedimento é composto pelos seguintes passos: (1) Avaliação dos índices de repercussão económica, social e ambiental, que definem a natureza intrínseca geral e operacional da estrutura, (2) Classificação da estrutura, com base nos índices obtidos no Passo 1, (3) Especificação dos níveis de projecto alvo, com base na classificação da estrutura (Passo 2).

A identificação desses níveis de projecto faz com que seja possível estimar a vida útil da estrutura, a probabilidade conjunta de falha dos principais modos de falha, a operacionalidade mínima, o número médio de falhas técnicas admissíveis, bem como a duração máxima admissível de uma paragem operacional (Puertos del Estado, 2002).

O procedimento de avaliação de risco proposto em Mendonça et al. (2012) é aplicado a estados limites operacionais (modos de falha ambientais), com base no quadro legislativo ambiental, agentes climáticos no litoral e a propagação e diluição do efluente.

A metodologia desenvolvida (Figura 1) analisa o comportamento da pluma do emissário submarino em cada intervalo de tempo (anual) com o objectivo de:

- Calcular a probabilidade de exceder um valor limite representativo cuja ocorrência pode ser significativa para a operacionalidade da estrutura (por exemplo, a concentração de coliformes fecais);
- Calcular a persistência de exceder esse valor limite;
- Calcular a frequência e sazonalidade;
- Identificar as áreas com maior probabilidade de excedência do valor limite;
- Estabelecer uma relação entre o vento e as correntes de superfície que verifique se a variabilidade espacial da pluma é determinada principalmente pelo forçamento atmosférico;
- Quantificar os mecanismos forçadores físicos que governam a variabilidade da pluma no sistema costeiro estudado;
- Definir a função de distribuição da pluma e os seus níveis característicos superior e inferior.

É utilizado o modelo numérico TELEMAC-2D (Galland et al, 1991): (i) para simular 25 eventos estatisticamente independentes (anuais), utilizando simulações de Monte Carlo para a geração de séries de vento como condições fronteira, e (ii) para representar as condições hidrodinâmicas anuais.

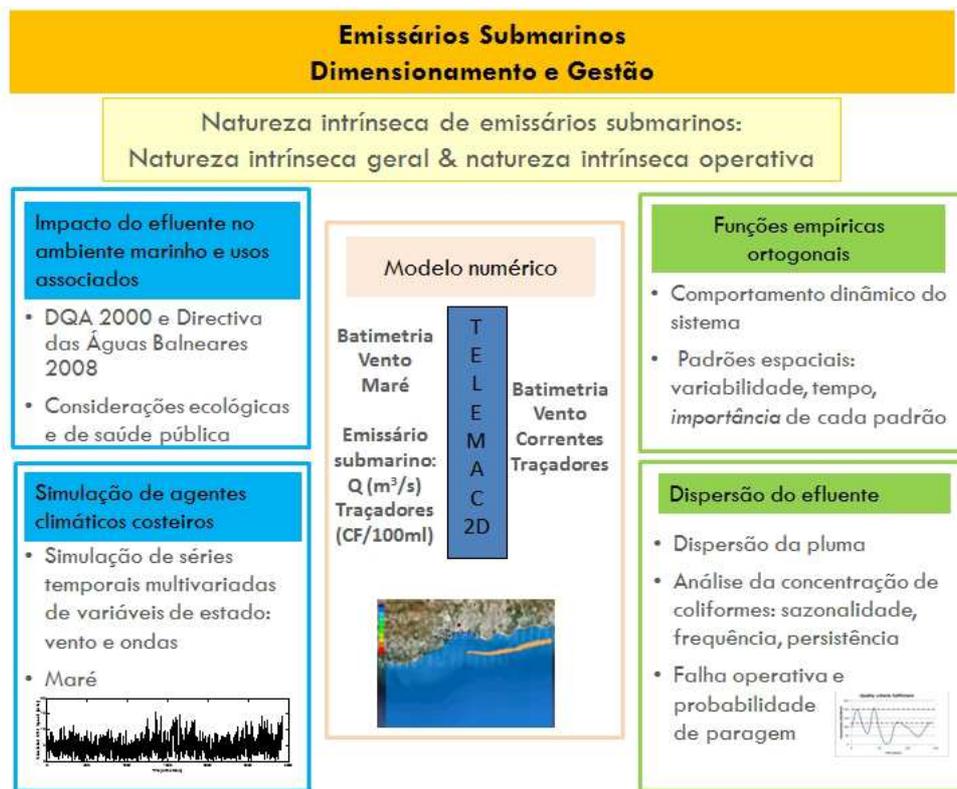


Figura 1. Esquema da metodologia desenvolvida.

As funções ortogonais empíricas (EOFs) são aplicadas às variáveis resultantes do TELEMAC-2D (concentração de coliformes, correntes e maré), de modo a reduzir a dimensionalidade do sistema e a encontrar os padrões mais importantes e explicativos das suas variações.

Para ilustrar o procedimento, é apresentada e descrita uma aplicação da metodologia proposta ao emissário submarino de Vale de Faro, situado na Praia do Inatel, em Albufeira, no litoral sul de Portugal (Figura 1) e cada parte da metodologia é descrita.

3 Natureza intrínseca dos emissários submarinos

A importância de uma estrutura marítima ou de uma das suas secções, bem como o impacto económico, social e ambiental produzido em caso de dano, destruição ou perda total de serviço e de funcionalidade, pode ser avaliada por meio da natureza intrínseca geral (GIN) da estrutura ou de qualquer uma das suas secções (Figura 2). O GIN é avaliado por identificar o modo de falha que dá o maior valor de repercussão dos principais modos atribuídos aos estados limites últimos (ULS) e aos estados limites de serviço (SLS) (Puertos del Estado, 2002).

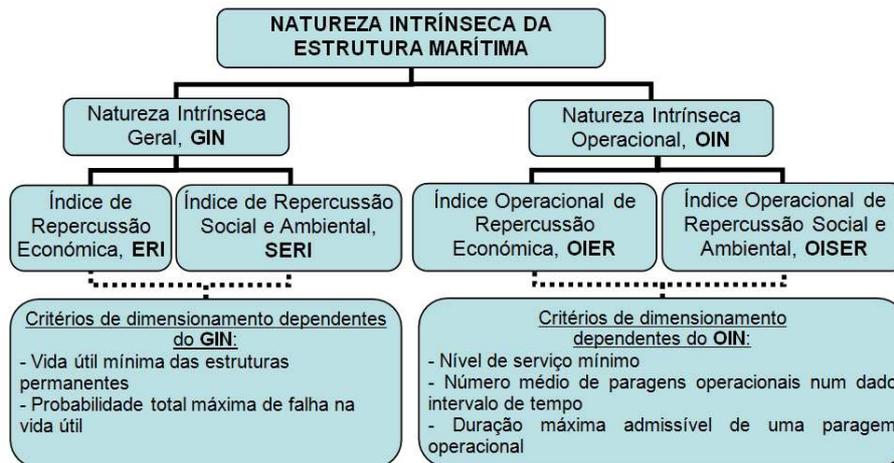


Figura 2. Natureza intrínseca do emissário submarino (Mendonça et al., 2013).

A natureza intrínseca geral da estrutura é função do índice de repercussão económica (ERI) e do índice de repercussão ambiental e social (SERI).

As repercussões económicas e as repercussões sociais e ambientais resultantes da paragem ou redução do funcionamento são especificadas pela sua natureza intrínseca operacional (OIN). A OIN é avaliada seleccionando o modo de paragem operacional que dá o nível operacional mínimo e é especificado em termos do índice operacional de repercussão económica (OIER) e do índice operacional de repercussão social e ambiental (OISER).

A exploração de qualquer secção de uma estrutura pode ser definida em termos: (i) dos níveis mínimos de operacionalidade (num período de tempo especificado a partir de estudos económicos anteriores), (ii) do número médio de paragens (num intervalo de tempo relacionado com factores sociais e ambientais), (iii) da duração máxima admissível de uma paragem num intervalo de tempo que depende de factores económicos e do ciclo de procura.

i. Operacionalidade mínima

A operacionalidade mínima de um emissário submarino (ou de cada uma das suas secções) depende das consequências de uma paragem, no contexto dos estados limites operativos, durante a fase de serviço, assim como do número médio de paragens e da duração máxima de cada paragem. Para a fase de serviço, a natureza operacional da estrutura tem em conta a importância geral dessas consequências. O valor, no entanto, não pode ser menor do que o valor obtido para o índice operacional de repercussão económica (OIER) e do que o índice operacional de repercussão social e ambiental (OISER). Nesse sentido, a operacionalidade da estrutura deve ser maior quando as consequências económicas da paragem operacional são mais importantes. Durante a sua vida útil, a operacionalidade da estrutura ou de uma das suas secções, em relação aos modos principais atribuídos aos estados limite de paragem em condições normais de trabalho e em operação, tem que ser pelo menos o valor apresentado na Tabela 1 de acordo com o OIER.

Tabela 1. Operacionalidade mínima na vida útil da estrutura.

Índice operacional de repercussão económica	Operacionalidade $r_{f,OLS}$
$OIER \leq 5$	0.90
$5 < OIER \leq 20$	0.95
$OIER > 20$	0.99

ii. Número médio de paragens

Num dado intervalo de tempo (normalmente um ano), e nos casos em que não tiver sido especificado *à priori*, o número médio de ocorrências de todos os modos atribuídos a estados limites de paragem (N_{stop}) corresponde ao valor indicado na Tabela 2. As principais razões para a paragem de emissários submarinos são a obstrução da conduta e do difusor, a excedência dos valores-limite recomendados para a descarga de efluentes, e a utilização de um *bypass*. Se a paragem operacional tem repercussões sociais e ambientais, não deverão ocorrer paragens. O emissário submarino deve, portanto, estar sempre operacional, exceto em caso de condições imprevistas extraordinárias. Ignorar estas recomendações pode representar um risco direto para a saúde das pessoas que entram em contato com a água contaminada. As pessoas podem ainda ser afectadas indirectamente através do consumo de peixe e marisco contaminados. Tais paragens ocorrem principalmente em períodos de chuvas, quando o efluente excede a capacidade do emissário submarino. As informações relativas ao *bypass* podem ajudar a determinar se as operações ou práticas de manutenção necessitam de ser melhoradas ou se o emissário necessita de obras de manutenção. N_{stop} pode ser avaliada como se segue (Tabela 2):

$$N_{stop} = \sum_{i=1}^3 L_i$$

onde L_1 representa a excedência dos valores-limite para a descarga, L_2 a obstrução da conduta ou difusor e L_3 *bypass* do efluente devido a caudal em excesso.

Tabela 2. Parâmetros relacionados com o número médio de paragens num intervalo de tempo.

	L1	L2	L3	$N_{stop} = \sum_{i=1}^3 L_i$
SERI ≤ 10	8	1	3	12
10 < SERI < 20	4	1	2	7
SERI ≥ 20	2	1	1	4

iii. Duração máxima da paragem operacional

Durante o tempo de vida útil da estrutura (e quando não existem especificações anteriores) a duração máxima provável de uma paragem (em horas) não pode exceder os valores da Tabela 3, com base no OIER e no OISER da secção afectada da estrutura.

Tabela 3. Duração máxima provável de um modo de paragem (horas).

Índice operacional de repercussão económica	Índice operacional de repercussão social e ambiental		
	OISER < 20	20 ≤ OISER < 30	OISER ≥ 30
OIER ≤ 5	24	12	6
5 < OIER ≤ 20	12	6	3
OIER > 20	8	4	2

4 Impacto ambiental do efluente no meio

Os instrumentos de gestão dos recursos hídricos têm um papel importante na prevenção de conflitos relacionados com a água, através da avaliação da variabilidade espacial e temporal do recurso em zonas costeiras. É assim importante seguir a política da água, a fim de promover o uso do solo mais adequado e melhor proteção da qualidade da água e dos ecossistemas associados. Neste contexto, também é importante relacionar e integrar a gestão dos recursos hídricos com a prevenção e proteção contra as condições hidrológicas extremas. A gestão dos emissários submarinos está vinculada:

- **À excedência dos valores limite:** relacionada com os agentes climáticos;
- **Ao impacto ambiental inaceitável ou repercussão social:** modos de paragem realizados para evitar danos às pessoas e meio ambiente;

- **Às restrições legais:** modos de paragem realizados para cumprir os requisitos legais.

De acordo com o quadro legislativo, a monitorização do emissário submarino é realizada com base em oito factores/constituintes críticos: salinidade, agentes patogénicos, nutrientes, turbidez, metais pesados, materiais naturais e orgânicos, hidrocarbonetos e pesticidas. Estes oito componentes podem ser avaliados no contexto de quatro áreas diferentes de medição ambiental: efluente, coluna de água, ambientes de fundo do mar e peixes, crustáceos e moluscos.

Este estudo analisa o comportamento da concentração de coliformes no efluente considerando o pior cenário, onde a estação de tratamento de águas residuais pára de funcionar.

5 Simulação dos agentes climáticos

Para simular o transporte de efluentes é necessário ter condições fronteira que forcem o modelo hidrodinâmico. Depois da maré astronómica, que é uma variável determinística, o agente forçador principal é o vento. Assim, para aplicar a verificação probabilística à metodologia proposta, é necessário implementar simulações de Monte Carlo para séries temporais de vento, representando tanto a velocidade, como a direcção do vento.

Neste trabalho é proposta uma metodologia de simulação que se baseia na utilização de distribuições mistas não-estacionárias para a dessazonalização dos dados e uma combinação de modelos baseados em cópulas e modelos auto-regressivos para auto-modelação e auto-correlação cruzada da série. A metodologia proposta, que se baseia em Solari e Losada (2011), pode ser resumida como se segue:

- A velocidade do vento é ajustada com uma função de distribuição de probabilidade paramétrica. Para isso é usado um modelo misto não-estacionário, composto por uma distribuição de Weibull de dois parâmetros truncada para a amostra total e uma distribuição generalizada de Pareto (GPD) para o limite superior (ver Solari e Losada, 2011, 2012a, 2012b).
- É utilizado um modelo de cópulas para simular a auto-correlação da série temporal da velocidade do vento dessazonalizada. O modelo Weibull-GPD é utilizado para a dessazonalização (ver Solari e Losada, 2011).
- As direcções de vento são ajustadas com um modelo paramétrico concebido para variáveis circulares (ver, por exemplo, Fisher, 1993). Neste caso é usado um modelo misto não-estacionário composto por duas distribuições *wrapped* de t-Student (a descrição desse tipo de distribuição é apresentada em detalhe em Solari e Losada (2012c)).
- É ajustado um modelo auto-regressivo para as direcções do vento dessazonalizadas, usando velocidades de vento dessazonalizados como uma variável exógena (modelo ARX).

Logo que os quatro modelos descritos estejam ajustados ao conjunto de dados original, são simuladas as novas séries temporais. Para isso, as séries temporais da velocidade do vento são simuladas em primeiro lugar, utilizando o modelo de dependência baseada em cópulas e a distribuição Weibull-GPD. Em seguida, as séries temporais de direcção do vento são simuladas condicionadas à velocidade do vento obtidas anteriormente, utilizando, neste caso, o modelo ARX e distribuições *wrapped* mistas.

6 Modelo numérico e *setup* da simulação

O sistema integrado TELEMAC-MASCARET, desenvolvido pelo *Laboratoire National d'Hydraulique da Electricité de France* (EDF) (Hervouet e Bates, 2000), contempla um conjunto de ferramentas usadas na análise de escoamentos em superfície livre. De entre os vários módulos que compõem este sistema, destaca-se o TELEMAC-2D, modelo hidrodinâmico bidimensional, que recorre ao método dos elementos finitos para resolver as equações

hidrodinâmicas de águas pouco profundas, de Saint-Venant (1871), nas respectivas dimensões. Em cada nó da malha computacional é calculada a profundidade da água e as duas componentes da velocidade.

A batimetria do domínio foi obtida a partir da carta hidrográfica do IH, Cabo de São Vicente à Foz do Guadiana, nº24206, escala 1:150000, e de dados disponibilizados pela empresa Consultores de Hidráulica e Obras Marítimas, SA (WW).

Foram utilizados os dados de maré referentes à boia de Lagos e à boia de Vila Real de Santo António, que foram impostos na fronteira Oeste e Este da malha, respectivamente. Estes dados foram obtidos em Antunes (2007).

A malha de elementos finitos utilizada no TELEMAC-2D (Figura 5a) tem 6361 nós e 12245 elementos triangulares que variam entre 145 m - 4612 m. As condições fronteira consistem na imposição da maré na fronteira oceânica e o vento é considerado dinâmico no tempo e constante no espaço.

O método de Thompson (Lang, 2010) é utilizado nas fronteiras oceânicas ocidental e oriental e utiliza o método das características para calcular novos valores dos parâmetros (por exemplo, de velocidade) e realiza pequenos ajustes para anular as inconsistências nas informações. Foi utilizado um passo de cálculo de 60 s para simulações de 25 anos de duração.

7 Funções empíricas ortogonais

No presente trabalho procuram-se identificar alguns padrões principais do comportamento da dispersão da pluma e das condições atmosféricas e hidrodinâmicas. Esses padrões são obtidos para a região de Vale de Faro, em Albufeira, empregando o método das funções ortogonais empíricas (EOF).

O método EOF possibilita a análise da variabilidade de variáveis, neste caso, da concentração de coliformes (CF). O método encontra padrões espaciais e de variabilidade temporais e dá uma medida da 'importância' de cada padrão (Björnsson e Venegas, 1997). Os valores da variável CF, resultantes das simulações com o TELEMAC-2D, são considerados na zona de entorno do emissário submarino, nos pontos x_1, x_2, \dots, x_p , e para os tempos t_1, t_2, \dots, t_n . Para cada tempo t_j ($i = 1, \dots, n$), as medições no ponto x_i ($i = 1, \dots, p$) funcionam como um mapa ou campo. A matriz F armazena essas informações: cada linha é um mapa e cada coluna é uma série temporal de observações para um determinado local. A análise EOF é realizada utilizando F como a matriz de dados.

A média é removida a cada uma das séries de tempo p de F , de modo que cada coluna tenha média zero. A matriz de covariância de F é formada calculando $R = F^T F$ resolvendo o problema do valor próprio $RC = C\Lambda$. Λ é uma matriz diagonal contendo os valores próprios λ_i de R . Os vetores coluna c_i de C são os vetores próprios de R correspondentes aos valores próprios λ_i . Ambos Λ e C são de dimensão p por p . Para cada valor próprio λ_i escolhido, o correspondente vetor próprio c_i é encontrado. Cada um destes vetores próprios pode ser considerado como um mapa. Os vetores próprios são as EOFs que se procura obter. Supõe-se que os vetores próprios são ordenados de acordo com o tamanho dos valores próprios. Assim, EOF_1 é o vector próprio associado ao maior valor próprio e o EOF_2 associado ao segundo maior vector próprio, etc. Cada valor próprio λ_i dá uma medida da fracção da variância total em R explicada pelo modo. O padrão obtido quando uma EOF é representada como um mapa representa uma oscilação *standard*. A evolução no tempo de uma EOF mostra como este padrão oscila no tempo. Para ver como a EOF_1 'evolui' no tempo calcula-se o vector dado por: $\vec{a}_1 = F\vec{c}_1$.

As n componentes do vector \vec{a}_1 são as projeções dos mapas em F para a EOF_1 e o vector é uma série de tempo para a evolução da EOF_1 . Em geral, para cada EOF_n calculada, é encontrada a correspondente a_j . Estes são as componentes principais das séries de tempo (PC) ou os coeficientes de expansão das EOFs que mostram como cada modo oscila no tempo. Assim como os EOFs não são correlacionados no espaço, os coeficientes de expansão não estão correlacionados no tempo. A razão é que os primeiros N vetores próprios estão a captar o

comportamento dinâmico do sistema enquanto os outros vectores próprios (correspondentes aos menores valores próprios) representam o ruído aleatório.

8 Caso de estudo: emissário submarino de Vale de Faro

Para ilustrar a metodologia desenvolvida, é analisada uma aplicação ao emissário submarino de Vale de Faro, situado na Praia do Inatel, em Albufeira, no litoral sul de Portugal.

Para a aplicação da metodologia proposta é usada uma série de vento de *hindcast*. Os dados foram fornecidos pelas autoridades portuárias espanholas (Puertos del Estado) e correspondem a um nó da rede localizado no Oceano Atlântico, próximo de Faro, Portugal (WANA ponto 1050048, Figura 3). O ponto mais próximo de Vale de Faro é o ponto WANA 1047048 e deve ser usado na progressão do estudo, embora se espere que as características do vento sejam semelhantes. A Figura 4 mostra um intervalo de tempo de quatro meses da velocidade do vento da série original e da série simulada.

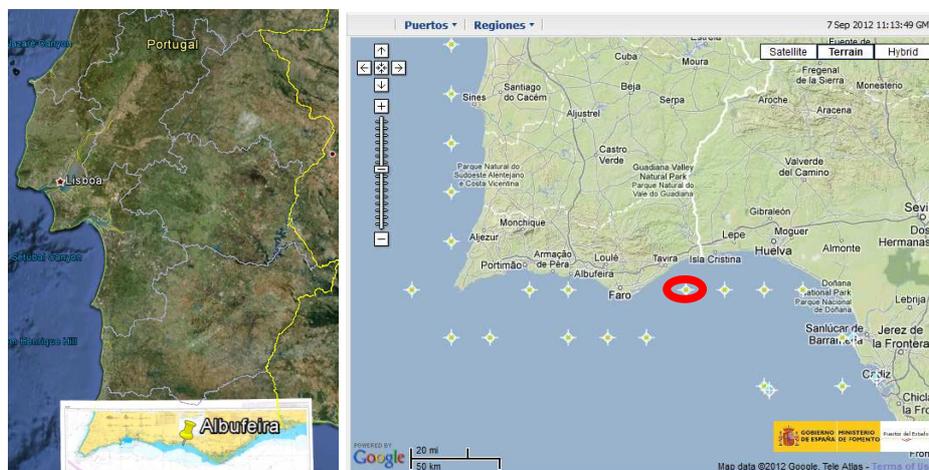


Figura 3. Puertos del Estado: Ponto WANA 1050048 (source: www.puertos.es).

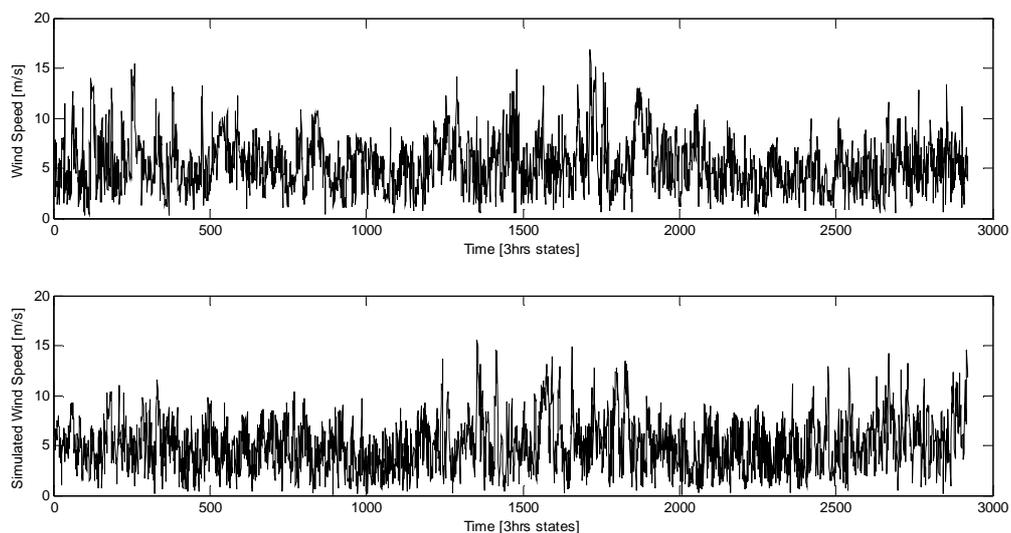


Figura 4. Séries temporais de velocidade do vento: original (em cima) e simuladas (em baixo).

A costa sul de Portugal é uma região protegida da agitação dominante e mais importante, proveniente do Atlântico Norte. Além da longa distância envolvida na propagação, as tempestades geradas no Atlântico Norte têm que contornar o sul da plataforma continental

Portuguesa para chegar à costa Algarvia (Figura 3). Estes fatores contribuem para uma dissipação importante de energia de tempestade e redução da altura de onda, que pode, conseqüentemente, introduzir diferentes padrões de variabilidade em situações de tempestade. O clima de ondas de tempestades locais também é influenciado pelas ondas de tempestades originárias da região do Estreito de Gibraltar (Almeida et al., 2011).

Albufeira, no sul de Portugal, tem 40828 habitantes residentes que triplicam na época de verão devido ao turismo. O emissário submarino de Vale de Faro foi escolhido por representar um tipo comum de emissário submarino em Portugal, com base no tipo de efluente (urbano) e da importância para a região em termos de turismo e população servida.

O emissário submarino, instalado em 1986, tornou-se subdimensionado devido ao número crescente de turistas na temporada de verão e uma nova estrutura foi proposta e construída em 2002. Estas estruturas foram monitorizadas e supervisionadas relativamente às características das águas residuais e características ambientais (tais como topografia e batimetria, materiais de fundo e morfologia), bem como relativamente à descrição de falhas importantes e menores que ocorreram.

O sistema serve cerca de 130000 PE e o efluente urbano é sujeito a tratamento secundário, para além de desinfecção no verão. O emissário, de HDPE, tem 1020 m de comprimento, com um diâmetro de 1000 mm e descarrega a 11 m de profundidade (nível de referência). O difusor tem 32 portas e 160 m de comprimento. O emissário submarino foi projetado para evitar a poluição das águas balneares e a sua eficiência está diretamente relacionada com a probabilidade de incumprimento dos critérios de qualidade da água.

O objetivo da aplicação da metodologia a este caso de estudo é analisar o comportamento da pluma e concentração de coliformes em áreas turísticas e sensíveis, perto de Albufeira, em caso de falha operacional. O pior cenário é representado considerando a concentração de coliformes constante e o caudal constantes ao longo do tempo. O modelo hidrodinâmico (TELEMAC-2D) é forçado com marés astronômicas e meteorológicas na fronteira oceânica e velocidade e direção do vento constantes no espaço e dinâmicas no tempo.

9 Resultados: transporte do efluente

Os coliformes foram estudados como os principais poluentes, com uma taxa de descarga de 6×10^8 CF/100ml, num efluente de $1,18 \text{ m}^3/\text{s}$, e uma diluição inicial de 60. A malha computacional estende-se de Lagos a Vila Real de Santo António, cerca de 112 km, e tem 12245 elementos triangulares e 6361 nós (Figura 5).

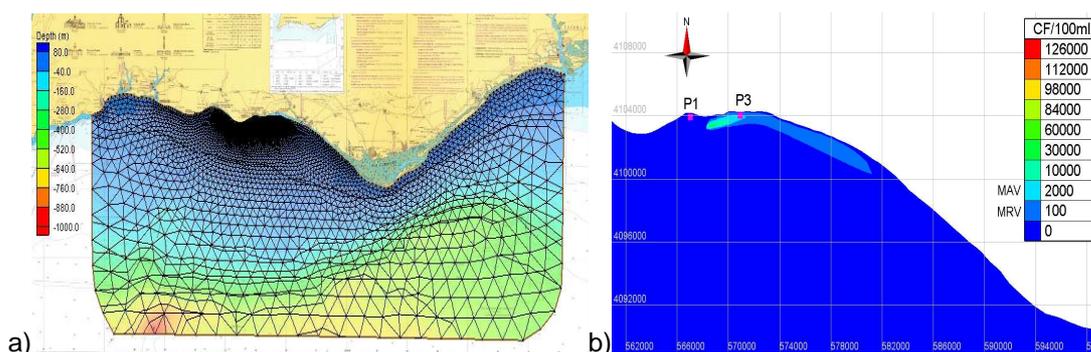


Figura 5. a) Malha computacional usada no TELEMAC-2D, b) Concentração de coliformes e pluma na zona do emissário submarino de Vale de Faro (28 de Fevereiro de 2023).

Os pontos de controlo foram selecionados com base na sua importância para as atividades humanas e áreas protegidas (P1 e P3 são observados na Figura 5b). A análise dos resultados foca-se na concentração de coliformes ao longo do tempo, considerando os limites estabelecidos na Directiva-Quadro da Água (valor máximo admissível MAV, 2000 CF/100ml e valor máximo recomendado, MRV 100 CF/100ml). Especial atenção é dada à probabilidade de

exceder o valor de concentração de coliformes (cuja ocorrência pode ser significativa para a operacionalidade da estrutura), à persistência na excedência desse valor limite e ao cálculo da frequência e da sazonalidade. Além disso, a variabilidade espacial e temporal da qualidade da água (com base na concentração de coliformes) em áreas importantes/sensíveis é também analisada. A Figura 5b apresenta um exemplo do comportamento da pluma do emissário submarino de Vale de Faro, onde a sua proximidade a zonas de importância balnear é observada.

Simulações com o TELEMAC-2D revelam que a dispersão do efluente provocada por correntes geradas pelo vento é maior do que a dispersão resultante das correntes geradas apenas pela maré. Além disso, as áreas com alta probabilidade de excedência do MAV (2000 CF/100ml), que apresentam maiores valores do traçador (coliformes), sob o efeito de maré e vento, ocorrem no local P3 (ver Figura 5b).

A simulação de 25 anos mostra que as falhas ocorrem sobretudo nos meses de Fevereiro-Julho e que a persistência de falha varia entre 1h-3h (Figura 6), provavelmente relacionada com o padrão de vento. A Figura 6 representa a concentração de coliformes nos pontos de controlo P1 e P3, para o período de Outubro de 2010 a Outubro de 2011. Na Figura 6a, ocorre apenas uma falha, ou seja, a concentração de coliformes excede o MAV (2000 CF/100ml) em apenas uma ocasião. A Figura 6b mostra 34 eventos de falha no ponto P3, que representa a área mais afetada em termos de poluição, pelo mau funcionamento do emissário submarino.

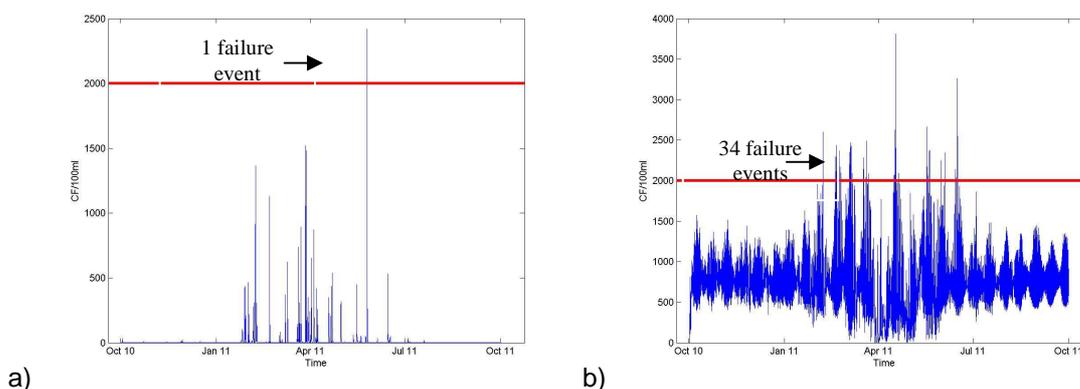


Figura 6. Pontos de controlo a) P1 e b) P3.

Foi aplicado o método das EOF aos resultados de concentração de coliformes em 804 pontos, num período de 25 anos (2010-2035), na zona do emissário de Vale de Faro. Os três modos principais das EOF representam um total de 80,64% da variância total de coliformes. Individualmente, representam 50,19%, 19,12% e 1,33% da variância. Os padrões espaciais associados a estes três modos são apresentados na Figura 7 como mapas homogêneos de correlação E_1 (CF), E_2 (CF) e E_3 (CF). E_1 (CF) e E_2 (CF) exibem deslocamentos leste-oeste que podem ser explicados pelo vento Atlântico (Figura 7a) e pela maré (Figura 7b). Em E_3 a variância local aumenta em direção à costa, sendo este comportamento característico da brisa local (Figura 7c). Simulações considerando apenas maré e sem vento mostram que a principal influência nesta área é a do vento.

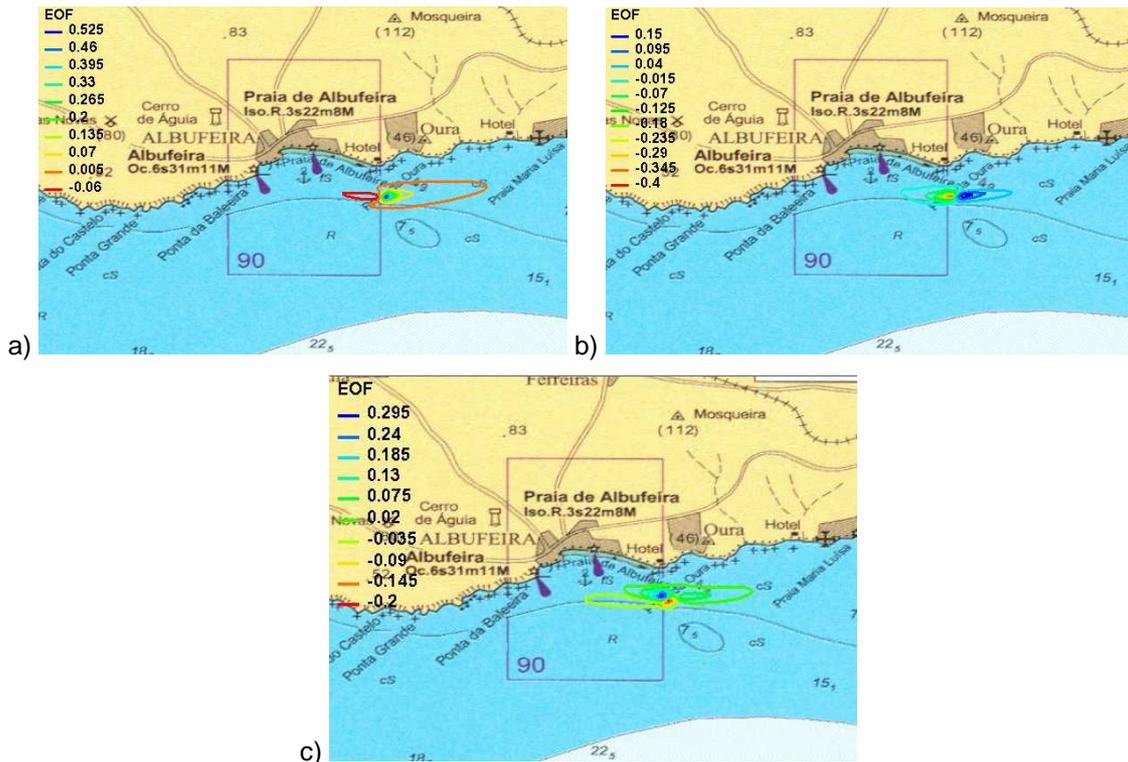


Figura 7. Padrões espaciais dos primeiros três modos EOFs: a) E_1 , b) E_2 , c) E_3 .

10 Conclusões

Este trabalho descreve uma metodologia de avaliação de risco para a fase de projeto de emissários submarinos. Os métodos e ferramentas usados consideram a aleatoriedade e a incerteza, permitindo a otimização de custos. Este artigo descreve as etapas da metodologia desenvolvida para apoio à tomada de decisões no que diz respeito aos níveis de projeto para emissários submarinos, quaisquer que sejam os materiais, técnicas e elementos utilizados na sua construção. Esta metodologia é uma versão revista e adaptada da proposta na ROM 0.0 para quebra-mares para ter em conta, em termos da natureza intrínseca geral e operacional, vários índices de repercussão (Puertos del Estado, de 2002; Losada e Benedicto, 2005) em emissários submarinos. Estes índices avaliam as consequências económicas, sociais e ambientais de falhas e modos de paragem.

A metodologia desenvolvida foi aplicada ao emissário submarino de Vale de Faro, situado na costa sul Portuguesa. A aplicação do modelo numérico (TELEMAC-2D) quantifica os mecanismos físicos que forçam a variabilidade da pluma, e consequentemente dos poluentes, no sistema costeiro estudado e é estabelecida uma relação entre o vento e as correntes de superfície, onde a variabilidade espacial da pluma é determinada principalmente por forçamento atmosférico. O transporte de um traçador passivo (coliformes) foi analisado em conjunto com a probabilidade de excedência de um valor limite representativo cuja ocorrência pode ser significativa para a operacionalidade do emissário submarino. Além disso, a persistência na excedência desse valor limite, a frequência e a sazonalidade também foram consideradas.

Os resultados desta metodologia ajudam, assim, a identificar a probabilidade de falha da estrutura e a definição de níveis de operacionalidade no projecto, permitindo a decisão em alternativas de projeto. O resultado permitirá a gestão operacional do emissário, já que permite obter taxas de falha anuais para poluentes e uma optimização no projeto de emissários submarinos, obtendo-se uma ferramenta de apoio ao projecto e gestão da estrutura.

Agradecimentos

Este estudo foi financiado pela Fundação para a Ciência e a Tecnologia, Portugal, através da bolsa de doutoramento SFRH / BD / 60748/2009, atribuída a Ana Mendonça. Os autores também agradecem o apoio técnico prestado pela WW - Consultores de Hidráulica e Obras Marítimas, SA, Portugal.

Referências

- Almeida, L.P., Ferreira, Ó., Vousdoukas, M., Dodet, G., 2011. Historical Variation and Trends in Storminess along the Portuguese South Coast. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 11, 2407-2417.
- Antunes, C., 2007. Previsão de Marés dos Portos Principais de Portugal. FCUL Webpage, http://webpages.fc.ul.pt/~cmantunes/hidrografia/hidro_mares.html.
- Björnsson, H. e Venegas, S.A., 1997. A manual for EOF and SVD - Analyses of Climatic Data. C2GCR Report No. 97-1.
- Fisher, N.I., 1993. *Statistical analysis of circular data*. Cambridge University Press.
- Galland, J.C., Goutal, N., Hervouet, J.M., 1991. TELEMAC: A New Numerical Model for Solving Shallow Water Equations. *Advances in Water Resources AWREDI*, Vol. 14, No. 3, pp. 138-148.
- Grace, R.A., 2009. *Marine Outfall Construction Background, Techniques, and Case Studies*. American Society of Civil Engineers. ISBN-10: 0784409846 (1991).
- Hervouet, J.M., Bates, P., (2000). *The TELEMAC modelling system, special issue*. *Hydrological Processes*. 14 (13), 2207-2208.
- Lang, P., 2010. 2D hydrodynamics TELEMAC-2D software, version 6.0 USER MANUAL, EDF-DRD.
- Losada, M.A. e Benedicto, M.I., 2005. Target Design Levels for Maritime Structures. *J. Waterway, Port, Coastal, and Ocean Eng.* 131, pp. 171-180.
- Mendonça, A., Losada, M.A., Neves, M.G., Reis, M.T., 2012. Operational forecast methodology for submarine outfall management: application to a Portuguese case study. *MWWD & IEMES 2012 7th International Conference on Marine Wastewater Discharges and Coastal Environment*, Montenegro, 22-26 October.
- Mendonça, A., Losada, M.A., Reis, M.T., Neves, M.G., 2013. Risk Assessment in Submarine Outfall Projects: the Case of Portugal. *Journal of Environmental Management*, Vol. 116, pp. 186-195.
- Puertos del Estado, 2002. *General Procedure and Requirements in the Design of Harbor and Maritime Structures. Part I: Recommendations for Maritime Structures*, Ministerio de Fomento, Puertos del Estado, Spain. ISBN 84-88975-30-9.
- Saint-Venant, A. J. C., 1871. *Théorie du mouvement nonpermanant des eaux, avec application aux crues des rivières et à l'introduction des marées dans leur lit*. *Compte-Rendu à l'académie des Sciences de Paris*, (73): 147-154. Van Leer, B. 1977.
- Solari, S. e Losada, M.A., 2011. Non-stationary wave height climate modeling and simulation. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 116, C09032, doi:10.1029/2011JC007101.
- Solari, S. e Losada, M.A., 2012a. Unified distribution models for met-ocean variables: Application to series of significant wave height. *Coastal Engineering*, Vol. 68, 67-77, doi:10.1016/j.coastaleng.2012.05.004.
- Solari, S. e Losada, M.A., 2012b. A unified statistical model for hydrological variables including the selection of threshold for the peak over threshold method. *Water Resources Research* (Accepted manuscript)
- Solari, S. e Losada, M.A., 2012c. Parametric and non-parametric methods for the study of the

variability of wave directions: application to the Atlantic Uruguayan coasts. Proceedings of the 33th International Conference on Coastal Engineering.