

POTENCIAL ENERGÉTICO DE LAS CORRIENTES GENERADAS POR LAS MAREAS EN LAS DESEMBOCADURAS DE LOS RÍOS Y ESTUARIOS

APLICACIÓN A LA RÍA DE AVILÉS



TESIS DOCTORAL

Juan Manuel González-Caballín Sánchez

Abril 2017

Programa de Doctorado: Ingeniería Energética



Universidad de Oviedo



Departamento de Energía

**POTENCIAL ENERGÉTICO DE LAS CORRIENTES GENERADAS
POR LAS MAREAS EN LAS DESEMBOCADURAS DE LOS RÍOS Y
ESTUARIOS.
APLICACIÓN A LA RÍA DE AVILÉS.**

Juan Manuel González-Caballín Sánchez

Abril 2017

Directores de Tesis:

D. Eduardo Álvarez Álvarez

D. Antonio José Gutiérrez Trashorras

Universidad de Oviedo

Departamento de Energía

Área de Máquinas y Motores Térmicos



Universidad de Oviedo



Departamento de Energía



RESUMEN DEL CONTENIDO DE TESIS DOCTORAL

1.- Título de la Tesis	
Español/Otro Idioma: POTENCIAL ENERGÉTICO DE LAS CORRIENTES GENERADAS POR LAS MAREAS EN LAS DESEMBOCADURAS DE LOS RÍOS Y ESTUARIOS. APLICACIÓN A LA RÍA DE AVILÉS	Inglés: ENERGY POTENCIAL OF TIDAL CURRENTS AT RIVER MOUTHS AND ESTUARIES. APPLICATION TO THE AVILÉS RIVER
2.- Autor	
Nombre: Juan Manuel Gonnzález-Caballín Sánchez	DNI/Pasaporte/NIE:
Programa de Doctorado: INGENIERÍA ENERGÉTICA	
Órgano responsable: DEPARTAMENTO DE ENERGÍA	

RESUMEN (en español)

La energía de las mareas está considerada como un recurso energético de gran interés debido a su carácter predecible y gran potencial energético. Las últimas investigaciones realizadas sobre la obtención de energía eléctrica a partir de las corrientes de marea, toman como referencia las instalaciones de parques de turbinas localizadas cerca de la costa. Esta solución prevé un doble efecto: incremento de la demanda de equipos instalados y reducción de costes operativos y de inversión. En éste contexto, el desarrollo de modelos de simulación numérica de máxima precisión, están considerados como una herramienta fundamental para obtener la confianza y fiabilidad en las instalaciones futuras.

La investigación establece una metodología precisa para evaluar los efectos de las corrientes, y el potencial energético derivado de los movimientos de las mareas en una ría o estuario. La metodología está basada en primer lugar, en la definición para los modelos bidimensional y tridimensional del área objeto de estudio, dotando un dominio suficientemente amplio para permitir la evolución de la superficie del agua y el aire. Posteriormente el modelo es mallado con volúmenes finitos, donde se aplican las ecuaciones no estacionarias de Navier-Stokes en ambas fases. De esta forma se tienen en cuenta las variaciones de la velocidad en función de la profundidad. La ecuación del volumen de un fluido (VOF) se utiliza para proporcionar una definición exacta de la interfase agua-aire. Las elevaciones en el nivel de agua de las mareas semidiurnas están incluidas en el modelo, utilizando una función definida por el usuario (UDF).

La metodología fue aplicada y validada mediante un modelo numérico bidimensional y tridimensional, aire-agua, en el puerto de Avilés (España). Se han obtenido los siguientes resultados en diferentes localizaciones a lo largo de la ría: altura de lámina libre de agua, ciclos de velocidad media, perfiles de velocidad en función de la profundidad y energía de las corrientes de marea.



RESUMEN (en Inglés)

Tidal energy is considered as an energy resource of maximum interest in both technical and research fields, due to its high unexploited energy potential. Latest approaches in obtaining electrical energy from tidal currents, are based on tidal array installations in on-shore locations, next to demand, thus reducing investment and operational cost. In this context, the development of simulation models of maximum accuracy is considered as a basic driver for the installations feasibility.

This research proposes an accurate methodology to evaluate the currents effects and the energy potential derived from tide movements in an estuary or port. The methodology is based, first, in the definition of a two-dimensional and three-dimensional geometrical models of the geographical area of study including enough space for tracking the water surface evolution and upper air. Then, the complete model is meshed with finite volumes, where the full three dimensional Unsteady Navier-Stokes equations are solved in both phases. Therefore, water velocity variations in the depth dimension are taken into account. The volume of fluid scheme is used to have an accurate definition of the water-air interface. The elevations in the water level of semidiurnal tides are included in the model by using a user defined function.

The methodology was applied and validated with two-dimensional a three-dimensional air-water numerical model of the Avilés Port (Spain). Different results were obtained along the port: water surface elevations, averaged velocities cycles, velocity versus depth profiles and tidal power and energy.

**SR. DIRECTOR DE DEPARTAMENTO DE ENERGÍA/
SR. PRESIDENTE DE LA COMISIÓN ACADÉMICA DEL PROGRAMA DE DOCTORADO EN INGENIERÍA
ENERGÉTICA**

RESUMEN

La búsqueda de recursos energéticos alternativos a los combustibles fósiles ha provocado un importante desarrollo de las energías renovables. Recientemente la energía oceánica ha comenzado a tener una gran repercusión mundial, en Europa ha recibido un importante impulso debido a las políticas energéticas dirigidas por la Comisión Europea.

Aunque el potencial energético marino es relevante, éste se ve reducido por condicionantes de tipo medioambiental, económico y técnico. Por ello las empresas e inversores dirigen la financiación hacia este campo cuando se demuestra su viabilidad; convirtiéndose la simulación numérica en una herramienta previa para la predicción de la rentabilidad energética en un área marina.

En la presente tesis se aborda el estudio de una de las fuentes de la energía oceánica: las corrientes marinas, siendo el ámbito de estudio las desembocaduras de los ríos y estuarios, particularizándose en la Ría de Avilés (Asturias).

Un primer paso en la elaboración del trabajo, ha consistido en investigar los principales métodos numéricos (unidimensionales, bidimensionales y tridimensionales) aplicados al estudio del medio marino. La mayoría destinan sus análisis a grandes masas oceánicas, con objetivos diversos, abarcando desde el transporte de sedimentos a estudios de las corrientes. Para ello recurren a las ecuaciones de transporte de flujo de Navier-Stokes, aunque dada la complejidad de cálculo de las mismas realizan diferentes simplificaciones: consideran una sola fase, promedian la velocidad en la dimensión vertical o adoptan la simplificación de flujo hidrostático.

En este trabajo se propone una metodología CFD, basada en la resolución de las ecuaciones de Navier-Stokes completas (RANS), bajo la hipótesis de Boussinesq. El dominio bifásico se resuelve mediante el modelo VOF (Volume of Fluid), y se utiliza el modelo $k-\varepsilon$ para la modelización turbulenta.

Los resultados obtenidos, para las mareas vivas y muertas, son:

- Altura de la lámina libre de agua
- Ciclos de velocidad media
- Perfiles de velocidades vs profundidad
- Potencia y energía de las corrientes de marea

Posteriormente los resultados fueron contrastados y validados, con las mediciones obtenidas en un estudio hidrodinámico realizado por la Autoridad Portuaria de Avilés.

ABSTRACT

The search for alternative energy resources to fossil fuels has led to a significant development of renewable energies. Recently, ocean energy has started to have a great impact in the world. In Europe it has received an important boost from the energy policies directed by the European Commission.

This thesis addresses one of the sources of ocean energy: marine currents. The area of study are the mouths of the rivers and estuaries, particularized to the Ría de Avilés (Asturias).

A first step in the elaboration of the work has been to investigate the main methods, from the unidimensional to the three-dimensional, which currently are used in the research of the marine environment. Most analysis are focus on large oceanic masses, with different objectives ranging from the transport of sediments to study of currents. To do this, they use the flow transport equations formulated by Navier-Stokes. As the analytical resolution of those equations is not possible, they are simplified either by averaging the velocity in the vertical dimension or adopting the hydrostatic simplification and working with a single phase.

The methodology is based on the Navier-Stokes equations, with the Reynolds approximation for the turbulent flow. They were solved under the Boussinesq hypothesis and considering a biphasic domain analyzed by the VOF (Volume of Fluid) method.

The results obtained, for neap and spring tides, are:

- Elevation of water surface
- Medium velocity cycles
- Velocity profiles
- Power and energy tide

Results were validated using the data from the Port Authority of Avilés.

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. La energía oceánica.....	2
1.2. Motivación de la tesis.....	5
1.3. Las mareas	6
1.4. Objetivos de la tesis	10
1.5. Estructura de la tesis.....	11
2. ESTADO DEL ARTE	13
2.1. Introducción	14
2.2. Modelos matemáticos de propagación del flujo con superficie libre.....	15
2.3. Modelos Unidimensionales	16
2.4. Modelos Cuasi-bidimensionales.....	20
2.5. Modelos Bidimensionales - Modelos de profundidad promediada	22
2.6. Modelos tridimensionales-3D	30
2.7. Programas genéricos para CFD.....	37
3. METODOLOGÍA	42
3.1. Análisis numérico mediante la Dinámica de Fluidos Computacional (CFD)	43
3.2. Ecuaciones de gobierno del flujo de un fluido	44
3.3. Mallado	45
3.4. Discretización de las ecuaciones y resolución.....	47
3.5. Métodos para la modelización de la superficie libre	48
3.5.1. Modelos multifase.....	48
3.5.2. Modelo "Volume Of Fluid" (VOF).....	49
3.6. Modelo de turbulencia.....	50
3.7. Condiciones de contorno, UDF y parámetros de resolución	53
3.8. Procedimiento de simulación	54
4. LA RÍA DE AVILÉS	56
4.1. Características de la Ría de Avilés.....	57
4.2. Datos existentes	57
4.2.1. Niveles de mareas	57
4.2.2. Estudio hidrodinámico de la ría.....	59
5. SIMULACIÓN CON MODELO BIDIMENSIONAL	60
5.1. Geometría.....	61
5.2. Mallado del dominio	62
5.3. Parámetros temporales.....	62

5.4.	Metodología de la simulación	63
5.5.	Resultados y discusión	64
5.5.1.	Altura de lámina libre, velocidades máximas y validación del modelo	64
5.5.2.	Ciclos de velocidad	65
5.5.3.	Perfiles de velocidad	67
5.5.4.	Potencia y energía de las corrientes de marea	69
5.6.	Conclusiones	71
6.	SIMULACIÓN CON MODELO TRIDIMENSIONAL.....	72
6.1.	Geometría.....	73
6.2.	Mallado del dominio	74
6.3.	Parámetros temporales y de resolución	76
6.4.	Metodología de la simulación	77
6.5.	Resultados y discusión	77
6.5.1.	Altura de lámina libre, velocidades máximas y validación del modelo	77
6.5.2.	Ciclos de velocidad	81
6.5.3.	Perfiles de velocidad	83
6.5.4.	Potencia y energía de las corrientes de marea	84
6.6.	Conclusiones	86
	BIBLIOGRAFÍA.....	87
	ANEXO	96

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1.1	Energía primaria. Consumo mundial de energía eléctrica	2
Fig. 1.2	Dispositivo para aprovechamiento energético de las olas. Pelamis, Reino Unido	3
Fig. 1.3	Turbina de eje horizontal, aprovechamiento de las corrientes marinas. Seagen,	3
Fig. 1.4	Grado de madurez de las energías oceánicas	4
Fig. 1.5	Desarrollo de la tecnología y tendencia del mercado	4
Fig. 1.6	Atracción gravitatoria de una masa sobre distintos puntos de la Tierra	7
Fig. 1.7	Mareas vivas y muertas	7
Fig. 1.8	Marea semidiurna en San Vicente de la Barquera (España)	9
Fig. 1.9	Marea mixta en Los Ángeles (Estados Unidos).....	9
Fig. 1.10	Marea diurna en Veracruz (Méjico).	10
Fig. 1.11	Tipos de marea. Incidencia en las costas	10
Fig. 2.1	Representación de σ -coordenadas y Z-coordenadas.....	31
Fig. 2.2	Elementos geométricos base de un mallado	38
Fig. 3.1	Ejemplo de mallado no estructurado	46
Fig. 4.1	Plano de situación de la Ría de Avilés	58
Fig. 5.1	Sección longitudinal de la Ría de Avilés.....	61
Fig. 5.2	Modelo equivalente bidimensional (2D).....	61
Fig. 5.3	Perspectiva y detalle. Mallado del modelo equivalente	62
Fig. 5.4	Líneas de rastreo. Análisis del campo de velocidades	63
Fig. 5.5	Evolución del nivel del mar durante el reflujó de marea viva	64
Fig. 5.6	Valores de velocidad media máxima (pruebas de marea)	65
Fig. 5.7	Velocidad media del agua en la sección $x=2.500$ m vs señal de entrada ..	66
Fig. 5.8	Ciclos de la velocidad media del agua en diferentes secciones (marea viva)	66

Fig. 5.9	Ciclos de la velocidad media del agua en diferentes secciones (prueba de marea muerta)	67
Fig. 5.10	Perfiles de velocidad durante el flujo de marea en la sección $x=100$ (prueba de marea viva)	68
Fig. 5.11	Perfiles de velocidad durante el reflujos de marea en la sección $x=2.500$ (prueba de marea viva)	68
Fig. 5.12	Perfiles de velocidad durante el instante $t=11.175$ s en el flujo de marea para diferentes secciones (prueba de marea viva)	69
Fig. 5.13	Potencia de la corriente de marea para diferentes secciones (prueba de marea viva)	69
Fig. 5.14	Potencia de la corriente de marea para diferentes secciones (prueba de marea muerta)	70
Fig. 5.15	Energía de la corriente de marea	71
Fig. 6.1	Puerto de Avilés - Localización de las secciones	73
Fig. 6.2	Modelo Geométrico.....	74
Fig. 6.3	Detalle del mallado.....	75
Fig. 6.4	Factor de sesgo, (Equitize skew), de una zona de mallado.....	75
Fig. 6.5	Detalle de la interfase	76
Fig. 6.6	Emplazamiento de los puntos de medida.....	77
Fig. 6.7	Contornos de máxima velocidad en la superficie libre en el flujo de marea (prueba de marea viva)	79
Fig. 6.8	Contornos de máxima velocidad en la superficie libre en el reflujos de marea (prueba de marea viva)	80
Fig. 6.9	Evolución del nivel del mar durante el reflujos de marea ($x=100$ m) (prueba de marea viva)	81
Fig. 6.10	Velocidad media del agua en la sección $x=50$ m vs. condición de contorno de altura de lámina libre (prueba de marea viva).	81
Fig. 6.11	Ciclos de velocidad media del agua en diferentes secciones (prueba de marea viva)	82
Fig. 6.12	Ciclos de velocidad media del agua en diferentes secciones (prueba de marea muerta)	82

Fig. 6.13	Secuencias de los perfiles de velocidad en el flujo de marea, sección x=100 (prueba de marea viva)83
Fig. 6.14	Secuencias de los perfiles de velocidad en el refluo de marea, sección x=100 (prueba de marea viva)83
Fig. 6.15	Secuencias de los perfiles de velocidad en el flujo de marea, sección x=880 (prueba de marea viva)84
Fig. 6.16	Secuencias de los perfiles de velocidad en el refluo de marea, x=880 (prueba de marea viva)84
Fig. 6.17	Potencia de las corrientes de marea en diferentes secciones (prueba en la marea viva)85
Fig. 6.18	Energía de las corrientes de marea en diferentes secciones.....85

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1	Potencial energético teórico de la energía oceánica	3
Tabla 2.1	Términos de la ecuación de movimiento de Saint Venant	17
Tabla 2.2	Modelos de simulación 2D	40
Tabla 2.3	Modelos de simulación 3D	41
Tabla 3.1	Ejemplo de programación de UDF para marea viva	54
Tabla 4.1	Niveles de mareas. Carta Náutica INT 1852	57
Tabla 4.2	Datos de mareas. Puerto de Avilés	59

NOMENCLATURA

A	Área de la sección mojada del canal
A_p	Presión debida a la amplitud de la marea o carrera
$C_{\varepsilon 1}$	Constante del modelo k-épsilon
$C_{\varepsilon 2}$	Constante del modelo k-épsilon
C_{μ}	Constante del modelo k-épsilon
d	Profundidad del agua
F	Fuerza
\overline{F}_v	Fuerza volumétrica
g	Aceleración gravitatoria
h	Calado
h_0	Altura de referencia
h_p	Altura de marea
G_k	Producción de energía cinética turbulenta
k	Coefficiente de conductividad térmica
P	Presión
$P_i(t)$	Potencia de la corriente de marea
$P(t)$	Presión aplicada a la entrada del dominio
P_0	Presión debida al nivel medio del mar
q	Flujo de calor por unidad de masa
Q	Caudal
Q_F	Caudal fluvial
Q_M	Caudal mareal
Re	Número de Reynolds
s'_{ij}	Tensor fluctuante de deformaciones
S	Término fuente
S_0	Pendiente del canal
S_f	Pendiente de fricción
S_{ij}	Tensor de deformaciones

t	Tiempo
T	Período
u	Componente de la velocidad en la dirección x
v	Componente de la velocidad en la dirección y
w	Componente de la velocidad en la dirección z
U_x, U_y	Componentes de la velocidad superficial promediadas en profundidad
\bar{v}_i	Base de vectores
v_i	Velocidad media en la sección
\dot{W}	Potencia
x	Coordenada cartesiana
y	Coordenada cartesiana
z	Coordenada cartesiana
z_b	Elevación del fondo
z_s	Elevación de la superficie libre

Símbolos griegos

α	Fracción de fluido ocupada por la fase
δ	Espesor de desplazamiento de la capa límite
ε	Tasa de disipación turbulenta
λ	Latitud terrestre
μ	Viscosidad dinámica
μ_t	Viscosidad artificial turbulenta
ν	Viscosidad cinemática
ν_t^H	Viscosidad cinemática turbulenta horizontal
ν_t^V	Viscosidad cinemática turbulenta vertical
π	Pi
ρ	Densidad
σ	Coordenada del sistema sigma-coordenadas
σ_ε	Constante del modelo k-epsilon
σ_k	Constante del modelo k-epsilon

$\underline{\underline{\sigma}}$	Tensor de tensiones
τ_{ij}	Tensiones de Reynolds
τ_{sx}, τ_{sy}	Componentes de las tensiones en el fondo en las direcciones x, y
τ_{bx}, τ_{by}	Componentes de las tensiones en la superficie libre en las direcciones x, y
$\tau_{xx}^e, \tau_{xy}^e, \tau_{yy}^e$	Tensiones efectivas
Ω	Velocidad angular de la Tierra

Operadores matemáticos

\int	Operador integral
∇	Operador gradiente. Operador divergencia
$\hat{\partial}$	Operador derivada parcial
Δ	Operador Laplaciana
\sum	Sumatorio
d	Operador derivada

Subíndices y superíndices

i	Componente i-ésima
j	Componente j-ésima
k	Componente k-ésima
$-$	Valor medio
$'$	Fluctuación

Siglas

BMMI	Mínima bajamar prevista en un período de 19 años
BMMM	Bajamar muerta media
BMVM	Bajamar viva media
CFD	Computacional Fluid Dynamics
DNS	Direct Numerical Simulation
EVM	Eddy Viscosity Models
FIDAP	Fluid Dynamics Analysis Package

Nomenclatura

FINE	Flow Integrated Enviroments
LES	Large Eddy Simulation
OES	Ocean Energy Systems
PHOENICS	Parabolic Hiperbolic Or Elliptic Numerical Integration Code
PISO	Pressure Implicit with Splitting of Operators
PMMA	Máxima pleamar prevista en un período de 19 años
PMMM	Pleamar muerta media
PMVM	Pleamar viva muerta
RANS	Reynolds Averaged Navier Stokes
RSM	Reynolds Stress Models
SIMPLE	Semi Implicit Method for Pressure Linked Ecuations
URANS	Unsteady RANS
VOF	Volume Of Fluid

1. INTRODUCCIÓN

1.1. La energía oceánica

La dependencia energética mundial de los combustibles fósiles para la generación de energía eléctrica, queda patente cuando tomando como referencia el consumo total de 23.816 TWh en el año 2014, se comprueba que la energía nuclear aportó 2.524 TWh, la hidráulica 3.905 TWh, el gas natural 5.144 TWh, el carbón 9.716 TWh y el petróleo 1.024 TWh; mientras que las energías renovables generaron 1.500 TWh, lo que supone una contribución del 6,3% en el mercado energético eléctrico mundial, tal como refleja la figura 1.1.

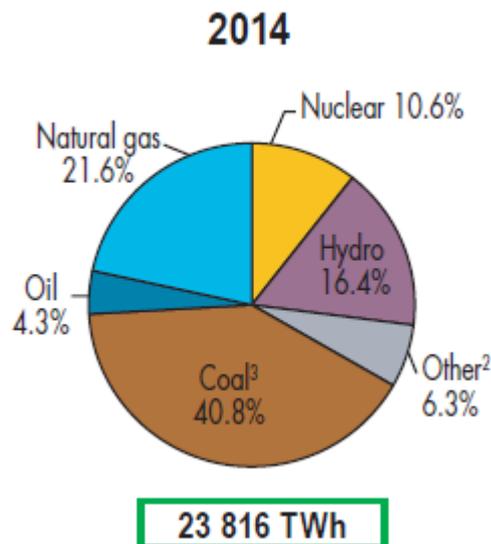


Fig. 1.1 Energía primaria. Consumo mundial de energía eléctrica [2]

Las zonas geográficas o naciones que contribuyen mayoritariamente a la producción total de energía, a partir de las fuentes renovables, son USA 20,7%, Europa 40,1% y China 15,35%. [1] [2]. La notable relevancia de la zona europea se debe a las políticas energéticas fruto de la creciente sensibilización social. Ejemplo de ello es la Directiva 2012/27 relativa a la eficiencia energética [3] y el denominado “Objetivo 20-20-20”, que en el año 2020 pretende:

- Reducir en un 20 por ciento las emisiones de CO₂ con respecto a las de 1990.
- Obtener al menos el 20% de consumo energético a través de las energías renovables.
- Reducir un 20% el consumo energético respecto al previsto para el año 2020.

Una energía alternativa con gran auge y potencialidad es la energía marina, debido a que se trata de un recurso continuo y predecible. La OES (Ocean Energy Systems) [4] clasifica las fuentes de energía oceánica, sin considerar la energía eólica marina, en:

- Olas.
- Mareas y corrientes:
 - Presas de marea.
 - Corrientes marinas.
 - Corrientes oceánicas.
- Osmótica oceánica.
- Térmica oceánica.



Fig. 1.2 Dispositivo para aprovechamiento energético de las olas. Pelamis, Reino Unido [4]



Fig. 1.3 Turbina de eje horizontal, aprovechamiento de las corrientes marinas. Seagen, Reino Unido [4]

Soerensen y Weinstein [5] cifra el potencial teórico, según la Tabla 1.1, para cada tipo de fuente de energía oceánica:

Olas	8.000-80.000 TWh/año
Corrientes marinas	800 TWh/año
Osmótica oceánica	2.000 TWh/año
Térmica Oceánica	10.000 TWh/año

Tabla 1.1 Potencial energético teórico de la energía oceánica

Por otra parte Sandén asigna el potencial energético estimado para las mareas en 22.000 TWh/año en el mundo [6]; actualmente y debido a los bajos rendimientos, solo se alcanza los 1.000 TWh/año de los cuales 105,4 TWh/año se producen en Europa [7], principalmente en Reino Unido, Francia, Irlanda, Holanda, Alemania y España.

Por ello existen importantes retos que debe afrontar la energía oceánica, entre otros: sistemas eficientes de conversión energética aplicados al recurso de las mareas, inversiones con altos costes operativos y de mantenimiento e impacto medioambiental [8] [9]. Sin embargo, el potencial energético marino resulta una inversión atractiva [10] en el futuro, prueba de ello son las estimaciones realizadas.

Las energías renovables han pasado por diversas etapas hasta alcanzar un alto grado de madurez, incrementado su participación en el marco de la producción eléctrica de manera notable.

El recurso energético que ofrecen los océanos es extraordinariamente grande, sin embargo la tecnología disponible está situada en una etapa de desarrollo conceptual o primaria [11] [12], tal como reflejan las figuras 1.4 y 1.5. Este hecho supone un estímulo para llevar a cabo la investigación en diferentes campos que abordan la materia, y que puede proporcionar un conocimiento añadido de interés.

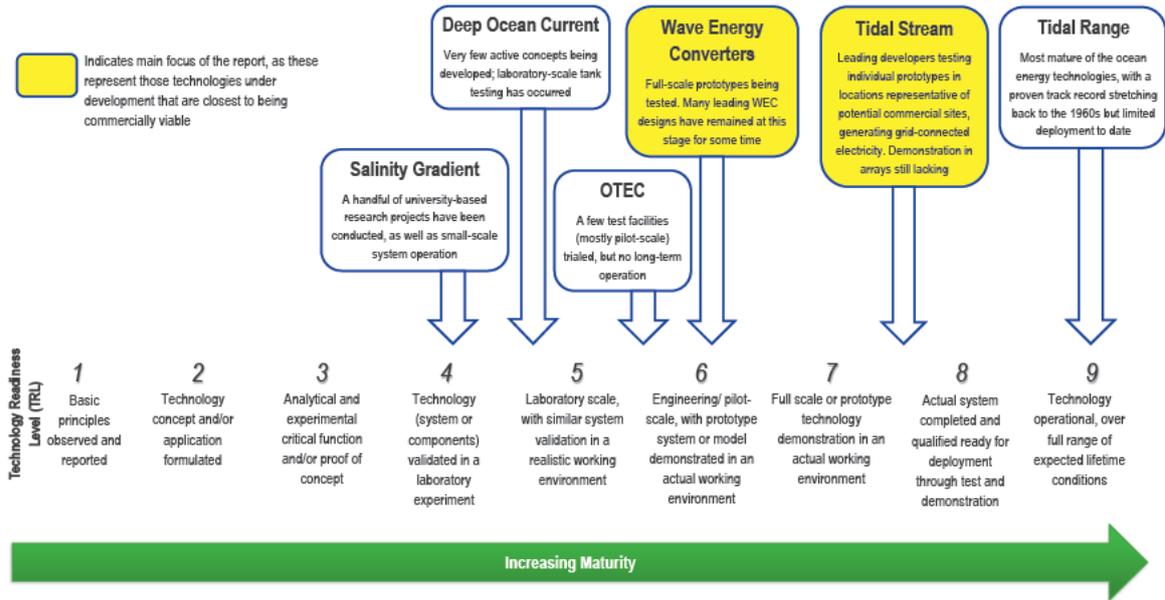


Fig. 1.4 Grado de madurez de las energías oceánicas [11]

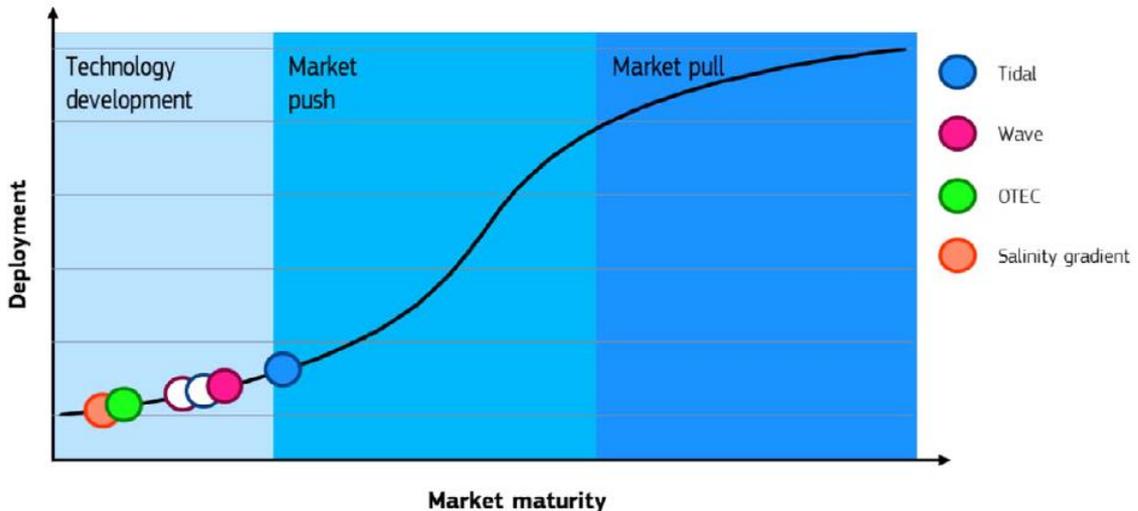


Fig. 1.5 Desarrollo de la tecnología y tendencia del mercado [13]

Hasta la fecha, la mayor parte de la energía marina producida proviene de las presas de marea construidas entre los años 1960 y 1980. La generación de energía eléctrica de estas presas se obtiene por el principio de generación hidráulica, aprovechando el flujo en ambas direcciones. Esta tecnología ha alcanzado un alto grado

de madurez y puede considerarse fiable. Sin embargo las instalaciones causan un alto impacto medioambiental que afecta al ecosistema y tienen cuantiosos costes de construcción. Actualmente hay cinco presas de marea relevantes: La Rance (240 MW) en Francia, Annapolis (20 MW) en Canadá, Kislaya Guba (400 kW) en Rusia, Creek Jangxia (500 kW) en China [14] y Sihwa Lake (254MW) en Corea del Sur [15].

En la última década, la generación de energía eléctrica se basa en nuevos diseños de turbinas de corriente marina que tienen gran similitud con las de viento. Un primer paso consistió en instalar las turbinas en zonas lejanas a la costa provocando menor impacto pero con importantes costes de inversión y mantenimiento. Por esta razón, algunos prototipos se encuentran actualmente en períodos de pruebas [16] [17], existiendo pocas instalaciones operativas que generen electricidad a la red, caso de la turbina SeaGen en Strangford Lough, Reino Unido [18].

Los proyectos más recientes están dirigidos al diseño de nuevas propuestas basadas en microturbinas agrupadas, “parque de turbinas”, [19][20], apropiadas para ubicaciones en la costa o cerca de ella, donde hay un gran potencial energético debido a la influencia de las mareas, y con bajo impacto medioambiental. Su emplazamiento posibilita la utilización de la energía generada cerca de los puntos de consumo energéticos, tales como ciudades o puertos [21] reduciendo los costes tanto operativos como de inversión. Ejemplos actuales de desarrollos precomerciales son el proyecto Maine en la bahía de Fundy (Canadá) [22], el proyecto Enermar en el estrecho de Messina (Italia) [23] y el proyecto RITE en Nueva York [24].

1.2. Motivación de la tesis

El desarrollo de la energía oceánica depende fundamentalmente de la confianza, basada en instalaciones que demuestren su operatividad tecnológica y económica; para lo cual es necesario realizar simulaciones previas, que una vez contrastadas con las mediciones de campo aseguren la viabilidad técnica.

Factores clave que dotan de fiabilidad a un “parque de turbinas” [25], son la estimación precisa del potencial energético, el acertado diseño para la optimización de microturbinas y el emplazamiento óptimo de los equipos.

Para cuantificar el recurso, las investigaciones están dirigidas a definir metodologías que evalúen la energía que ofrecen las corrientes de marea [26]. El diseño de nuevas microturbinas, está orientado a la mejora de la eficiencia así como a la aplicación, en algunos casos, a corrientes de baja velocidad, 0,2 o 0,3m/s [16]. Por último se debe estudiar, para cada caso, la influencia que tiene sobre la fiabilidad de la instalación la localización de las turbinas [27].

Los actuales estudios de flujo de las mareas se realizan en grandes áreas continentales marinas por medio de modelos de simulación, que requieren un gran consumo de recursos computacionales. Para tratar de evitarlo se recurre fundamentalmente a dos simplificaciones: utilizar un tamaño de malla gruesa (resolución >100 m) y considerar despreciables las variaciones de velocidad en la dimension vertical [28].

De acuerdo con la segunda simplificación se han desarrollado dos tipos de soluciones cuyo desarrollo matemático se basa en las ecuaciones de Navier Stokes:

- Modelos bidimensionales, que toman las dos componentes de la velocidad horizontal promediada en profundidad, denominadas 2D en aguas someras (“shallow water”) o 2D-SW.

- Modelos tridimensionales que tienen en cuenta las variaciones de las componentes de las velocidades horizontales con la profundidad, empleando normalmente la simplificación de la presión hidrostática, denominados 3D-SW.

Estos métodos calculan las variables en una sola fase, agua, y desprecian la componente vertical de la velocidad dando lugar, cuando menos, a estimaciones simplificadas, por lo que existe indeterminación en los resultados debido a las premisas.

La metodología que aquí se desarrolla resuelve las ecuaciones RANS, asumiendo la hipótesis de Boussinesq, aplicadas a un fenómeno multifásico: agua y aire, mediante el modelo VOF.

De esta forma se obtienen los valores de las variables: presión, velocidad y altura de lámina libre, permitiendo realizar el cálculo de la energía disponible en cualquier parte del dominio objeto de estudio.

1.3. Las mareas

Las mareas, definidas como las oscilaciones que se crean en el agua de los océanos y mares, tienen su origen fundamental en la atracción que ejerce la Luna y el Sol sobre la Tierra. A pesar de que la masa de nuestro satélite es mucho menor que la de la estrella, $m_{Sol} \approx 27 \cdot 10^6 m_{Luna}$, se encuentra más cercano, $297 \cdot 10^3 km$ aproximadamente, que el Sol, $150 \cdot 10^6 km$; por lo que tiene una mayor influencia sobre las mareas [29]. Este fenómeno físico no sólo implica un movimiento vertical ascendente y descendente del agua, sino que al subir o bajar el nivel de la misma, se producen también movimientos horizontales que se conocen como corrientes de marea.

El centro de masas, baricentro, Tierra-Luna está situado en el eje formado por la unión de los centros entre los dos astros, y se encuentra desplazado hacia la Tierra invadiendo su esfera.

Las fuerzas que generan las mareas, son fundamentalmente dos:

- Fuerzas gravitatorias entre la Tierra y la Luna.
- Fuerza centrífuga alrededor del baricentro.

Respecto a la primera, los puntos geográficos terrestres más cercanos a la Luna tendrán una componente de fuerza de atracción gravitatoria mayor que aquellos que estén a 90° o en la cara opuesta, tal como refleja la figura 1.6.

Por otra parte se produce una fuerza centrífuga de mayor magnitud, en los puntos geográficos de la cara más alejada del baricentro que en aquellos más cercanos.

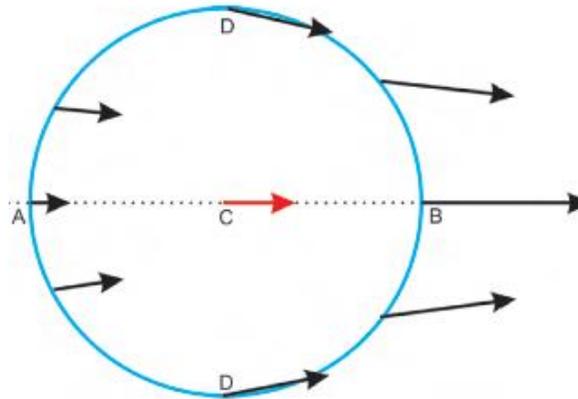


Fig. 1.6 Atracción gravitatoria de una masa sobre distintos puntos de la Tierra [30]

La combinación de estos dos efectos provoca que cuando la Luna está en fase llena o nueva, alineación, se produce la marea viva o de sicigia, y cuando está en cuarto menguante o creciente se genera la marea muerta o de cuadratura, tal como muestra la figura 1.7. El período de cada uno de estos ciclos es de 14 días aproximadamente.

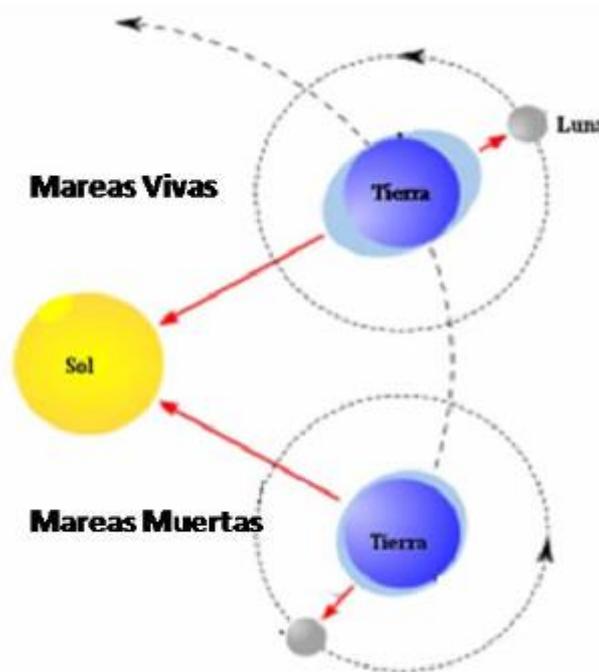


Fig. 1.7 Mareas vivas y muertas

Por otra parte se debe considerar el movimiento de traslación, elíptico, de la Tierra alrededor del Sol. Las mareas vivas de mayor amplitud se producen cuando la situación entre la Tierra y la Luna es la más próxima posible, equinoccio de otoño o de primavera, y las mareas muertas de menor amplitud cuando la distancia es la mayor posible entre los dos cuerpos, solsticio de verano o de invierno.

En una situación geográfica determinada los períodos de los ciclos de marea se originan, astronómicamente, por: los efectos del ángulo de declinación tanto del plano de rotación de la Luna alrededor de la Tierra como el de la eclíptica con respecto al ecuador terrestre, la variación de las distancias entre el trinomio celeste y la localización del lugar en que nos encontremos. De esta forma se establece una división de los tipos de mareas

teniendo en cuenta el número de pleamares y bajamares en un día lunar y la amplitud de las mismas, como: semidiurna, mixta y diurna.

Para caracterizar cada tipo de marea se utiliza el factor de forma, F , [31] que toma la siguiente expresión:

$$F = \frac{A_{k1} + A_{o1}}{A_{M2} + A_{S2}} \quad (1.1)$$

representando:

A_{k1}, A_{o1} : Amplitudes de amónicos principales diurnos

A_{M2}, A_{S2} : Amplitudes de armónicos principales semidiurnos

M_2 y S_2 , denominadas componentes lunar y solar principal semidiurna corresponden respectivamente a las ondas de marea que originarían la Luna y el Sol ficticios, que describiesen órbitas circulares en el plano del ecuador con una velocidad igual a la velocidad media de la Luna y el Sol reales.

K_1 y O_1 son la componente lunisolar declinación diurna y componente lunar declinación diurna, son también falsos componentes que simulan el ciclo entre las máximas declinaciones de la luna.

En función del valor de F , las mareas se definen:

$0 < F < 0,35$	Semidiurna pura
$0,35 < F < 1,5$	Mixta, mayoritariamente semidiurna
$1,5 < F < 3$	Mixta, mayoritariamente diurna
$F > 3$	Diurna pura

Las figuras 1.8, 1.9 y 1.10 representan las predicciones de la United Kingdom Hydrographic Office [32] en diferentes localizaciones geográficas para las mareas semidiurna, mixta y diurna respectivamente.

- Marea semidiurna: Dos pleamares y dos bajamares por día lunar.

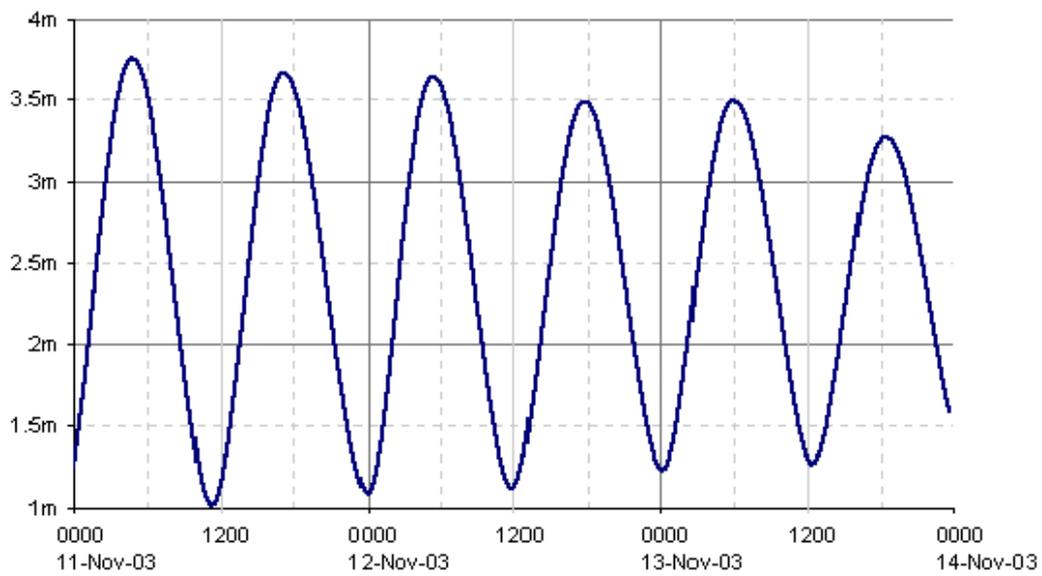


Fig. 1.8 Marea semidiurna en San Vicente de la Barquera (España)

- Marea mixta: Dos pleamares y dos bajamares, por día lunar, con desigualdades en las alturas de las mareas sucesivas.

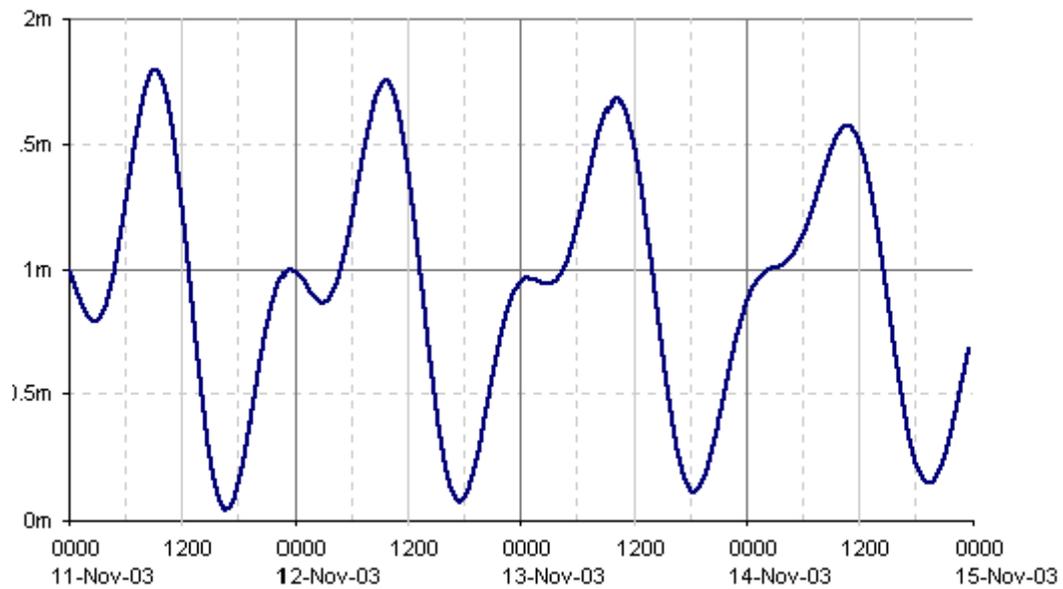


Fig. 1.9 Marea mixta en Los Ángeles (Estados Unidos)

- Marea diurna: Una pleamar, única por día lunar.

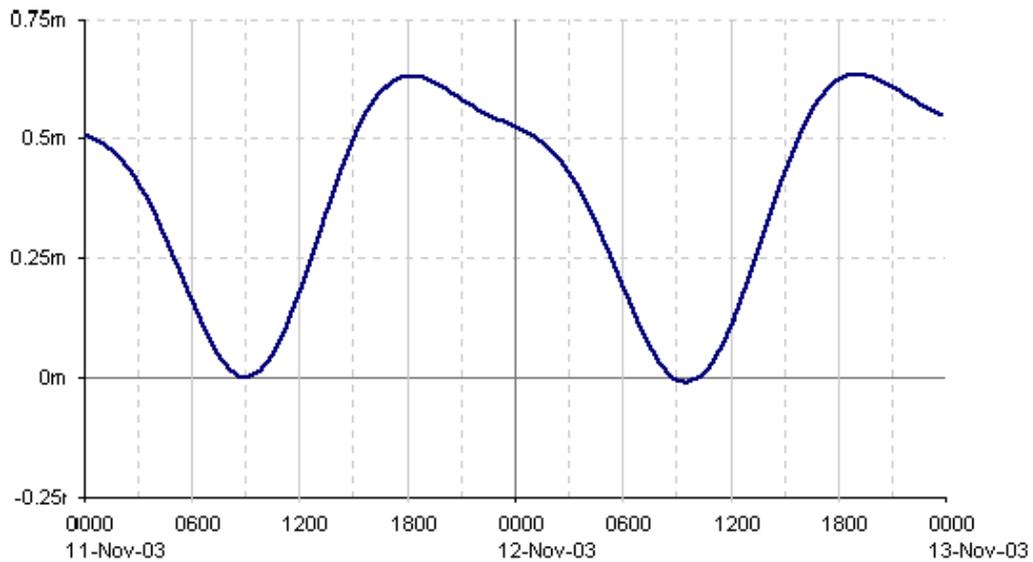


Fig. 1.10 Marea diurna en Veracruz (Méjico)

En la figura 1.11 se observa que tipo de mareas afectan a las diferentes costas terrestres.

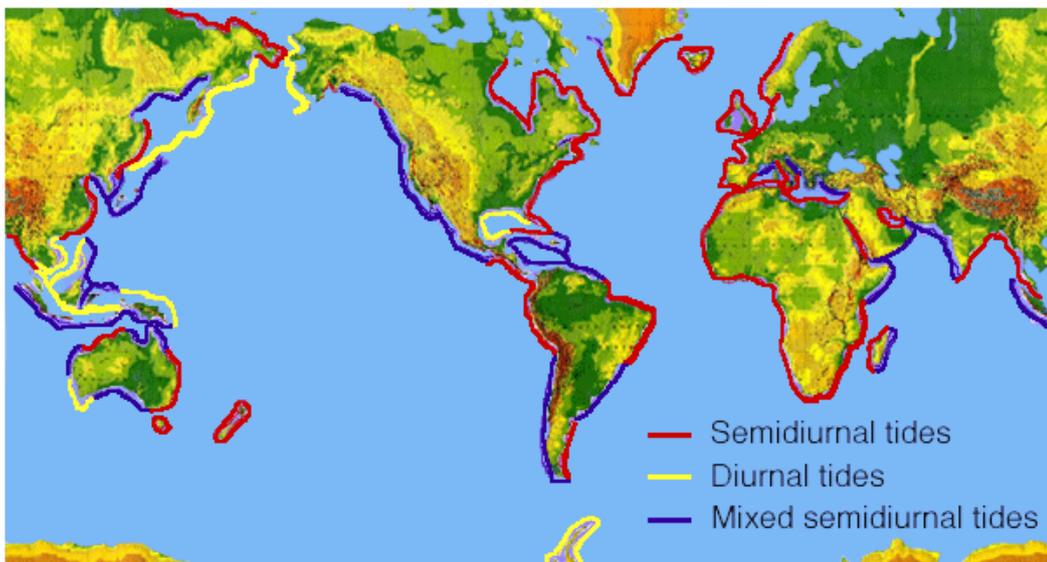


Fig. 1.11 Tipos de marea. Incidencia en las costas [30]

La marea que caracteriza la Ría de Avilés es semidiurna, por ello se consideran ciclos con períodos cada 12 horas y 25 minutos, es decir 44.700 s.

1.4. Objetivos de la tesis

El objetivo general de esta tesis consiste en desarrollar una metodología de análisis numérico a través de CFD para evaluar el potencial energético de las corrientes marinas

en estuarios y rías, validada mediante datos tomados en el emplazamiento objeto de estudio.

Como objetivos específicos se plantean:

- Simulación mediante CFD, considerando: flujo bifásico, no estacionario e incompresible, para el que se utiliza el método VOF aplicado a modelos bidimensional y tridimensional.
- Análisis de los modelos definidos previamente, obteniendo para todas las zonas del dominio:
 - a) Campo de velocidades espacio-temporal.
 - b) Evolución de la altura de lámina libre.
 - c) Energía disponible.
- Validación de la metodología desarrollada, a través de dos vías, mediante:
 - a) Análisis de la calidad del mallado y la convergencia del modelo numérico implementado.
 - b) Contraste con los datos tomados “in situ”, suministrados por la Autoridad Portuaria de Avilés [33].

1.5. Estructura de la tesis

La memoria de la tesis se estructura en seis capítulos y un apéndice. En el primer capítulo se ha realizado una descripción sobre el estado actual de la energía oceánica, en el ámbito de las energías renovables, además de una breve explicación de la fuerza impulsora de las corrientes marinas, las mareas; para finalizar la introducción se enumeran los objetivos del trabajo.

En el capítulo 2 se realiza un estudio de los métodos de simulación numérica, aplicados al flujo con superficie libre más empleados en la actualidad. Los modelos abordados se han dividido en uni, bi y tridimensionales; describiendo los métodos numéricos empleados y las simplificaciones que se llevan a cabo, el método de cálculo de la altura libre y el tratamiento de la turbulencia.

El comienzo del capítulo 3, se dedica a realizar un repaso histórico de la evolución de la CFD. Posteriormente se realiza la descripción de las sucesivas etapas que describen las características de la metodología empleada en la tesis: mallado, descripción de los modelos multifásicos y aplicación del VOF, condiciones de contorno empleadas y modelo de turbulencia elegido.

En el capítulo 4, se realiza una descripción del dominio físico de aplicación del modelo, la Ría de Avilés. Se describen las características de las mareas y el estudio llevado a cabo por la Autoridad Portuaria de Avilés, que servirá como validación del modelo.

Los capítulos 5 y 6, muestran los resultados, datos y gráficos, obtenidos en los modelos bidimensional y tridimensional respectivamente. Los dos capítulos siguen un

mismo orden, de forma que pueden observarse las diferencias entre ellos. Por último se establecen las conclusiones derivadas de los resultados obtenidos en la simulación.

Un apartado de bibliografía finaliza la memoria de la tesis, junto con un apéndice que contiene un artículo publicado en revista con impacto JCR, fruto del trabajo desarrollado en la elaboración de la tesis.

2. ESTADO DEL ARTE

Para llevar a cabo el estudio de las corrientes marinas se emplean, mayoritariamente, simulaciones numéricas que utilizan simplificaciones con el objeto de reducir los tiempos de cálculo que se producen cuando el modelo emplea las ecuaciones de gobierno de un fluido, formuladas por Navier-Stokes con la aproximación de Reynolds, ecuaciones RANS.

En este capítulo se refleja la evolución de los modelos de simulación numérica, empleados en el ámbito marino y fluvial. Por otra parte se describen los modelos unidimensionales, bidimensionales y tridimensionales más utilizados, realizando especial incidencia en la metodología que sigue cada uno de ellos: solución numérica empleada junto con las simplificaciones que se adoptan, cálculo de la altura de lámina libre y modelo turbulento. Finalmente se describen los programas genéricos para CFD.

2.1. Introducción

La preocupación social por el desarrollo de las energías renovables y la búsqueda de nuevas alternativas energéticas, en este campo, han provocado diversos estudios con el objetivo de conocer y valorar la energía que podemos extraer de las corrientes oceánicas. Para ello se han desarrollado históricamente diversos tipos de aplicaciones que ayudan a modelizar el medio acuático.

Por otra parte las tecnologías marinas se encuentran en un alto grado de inmadurez. Para que el mercado considere un proyecto viable se deben abordar múltiples retos, la mayoría de ellos técnicos y tecnológicos, entre los que se encuentran la fiabilidad en la modelización de los emplazamientos objeto de estudio [34] [35].

Existe una gran inquietud sobre el aprovechamiento energético que pueden proporcionar zonas cercanas a la costa, donde se puede gestionar mejor el recurso debido a la proximidad a los puntos de entrega energéticos. Una condición necesaria para evaluar el rendimiento que ofrece el área objeto de estudio, es la simulación numérica acompañada por la comprobación experimental.

La simulación, utilizando modelos numéricos en el medio ambiente marino, es esencial para resolver un amplio espectro de preocupaciones sociales, muestra de ello es la predicción de los procesos oceánicos –circulación, turbulencias, sedimentos- en estuarios y costas. También son objeto de estudio temas relacionados con la navegación, pesca, seguridad y salud.

Un modelo marino es altamente complejo, se deben realizar estudios que toman como base la ingeniería hidrodinámica a través de la cual, entre otros parámetros, determinamos la altura del nivel del agua, velocidad, presión, temperatura o concentración de sal.

Históricamente los modelos fueron desarrollados para aplicaciones específicas: climas, predicciones costeras, etc.. Recientemente varios de los modelos han sido enriquecidos con algoritmos de carácter general que conducen a un amplio rango de soluciones. Cronológicamente primero se realizaron estudios analíticos, en la actualidad se realizan simulaciones por medio de ordenadores que resuelven las ecuaciones de gobierno del flujo mediante una discretización espacio-temporal, la denominada técnica de la Dinámica de Fluidos Computacional -CFD-, acompañadas por estudios de campo con la intención de corroborar los resultados obtenidos previamente.

Un breve repaso cronológico, que refleja el desarrollo del conocimiento en la materia que nos ocupa, se puede encontrar en el trabajo de Jhon Z. Shi [36], donde explica que los estudios y cálculos de las mareas tanto en aguas costeras como en estuarios comenzaron a ser desarrollados en la década de los años veinte del siglo pasado. G.I. Taylor [37] y J. Proudman [38] estudiaron el comportamiento de las mareas en estuarios, golfos y canales. En el año 1931 S.F. Grace estudió el movimiento de las mareas en el Golfo de Suez [39] y en 1932 A. Doodson y R.H. Corkan desarrollaron los principales constituyentes de las mareas en el mar de Irlanda [40]. En la década de los años 60, J.R.H Otter y A.S. Day trabajaron en el cálculo computacional de los flujos de marea [41] y Jhons B. indagó en la estructura vertical de los flujos en los estuarios [42]. En 1965 Rossiter y Lennon investigaron las mareas del estuario del río Támesis [43]. En la década de los setenta, en 1974, J.E. Banks desarrolló un modelo matemático que evaluaba el comportamiento de las mareas debido a la interacción del Mar del Norte, en su región sureste, y el estuario del río Támesis (Inglaterra) [44]. Con posterioridad A.F. Blumberg realizó el estudio numérico en la Bahía de Chesapeake (EE.UU), en 1977 [45]. En la década de los ochenta F.S. Henry estudió modelos numéricos de flujo en el estuario del río Delaware (EEUU) [46], y en 1991 Muchow y Garvine llevan a cabo el análisis de mareas y bores barotrópicas en Conwy Estuary (Gales-Reino Unido) [47].

Recientemente, año 2006, D. Liang et al. estudiaron la mejora de los modelos matemáticos en los flujos de marea, realizando las pruebas en Poole Harbour (Dorset, Inglaterra) [48].

El objetivo general de la modelización matemática del flujo de un fluido consiste en hallar los valores que toman las variables hidráulica (altura de lámina de agua, velocidad, presión, etc.) a partir de la resolución por métodos numéricos de unas ecuaciones obtenidas con una serie de hipótesis. La modelización matemática consiste en reproducir la realidad física, y este objetivo será más preciso en la medida que mejor se adapten las ecuaciones de partida, y la resolución del esquema numérico, al fenómeno que se está estudiando.

Para llevar a cabo la modelización del proceso físico necesitamos resolver ecuaciones complejas con grado superior a uno; pueden ser ecuaciones diferenciales ordinarias (ODES) o ecuaciones en derivadas parciales (PDES).

Para resolver las ecuaciones de gobierno existen tres técnicas: método de diferencias finitas (MDF), método de elementos finitos (MEF) y método de volúmenes finitos (MVF).

El MDF es el esquema discreto más simple pero con gran eficiencia computacional; se puede aumentar el orden de aproximación deseado de las derivadas de las variables. En otro sentido realiza aproximaciones a los contornos costeros introduciendo una transformación de coordenada curvilínea ortogonal o no ortogonal. Una limitación del método es el requerimiento de una malla estructurada, por lo que esta transformación no resuelve las irregularidades de las geometrías de islas y calas.

El MEF tiene la ventaja de la flexibilidad geométrica. Para mallados refinados, los elementos finitos triangulares, 2-D, o tetraédricos, 3-D, han sido ampliamente utilizados en modelos costeros y estuarios. Los elementos finitos han sido utilizados en análisis de fuerzas en el plano, solución de problemas de campo, geología, circulación en lagos y dinámica de fluidos. Pueden abordar la batimetría topográfica debido a su capacidad de adaptación a la geometría de los emplazamientos, por ello se pueden representar geometrías y contornos irregulares utilizando el mallado no estructurado.

El MVF realiza la discretización de las ecuaciones en el espacio físico que ocupa el dominio objeto de estudio, por lo que no se debe realizar una transformación de coordenadas como ocurre en el método de diferencias finitas. Por otra parte pueden emplearse mallados estructurados y no estructurados; este hecho le proporciona gran flexibilidad de adaptación, además el cálculo matemático resulta más sencillo que en el MEF. Se puede decir que el MVF es una mezcla de los MEF y MDF ya que proporciona una alta eficiencia computacional a la que aúna la flexibilidad geométrica [49]. Actualmente es el método más utilizado dada su mayor precisión, lo que proporciona una resolución más exacta.

2.2. Modelos matemáticos de propagación del flujo con superficie libre

La estrategia general para abordar las ecuaciones que rigen el flujo de un fluido se lleva a cabo mediante las ecuaciones de Navier-Stokes, cuya resolución es analíticamente inviable y computacionalmente costosa, lo que provoca la adopción de una serie de simplificaciones como se verá más adelante. Por ello los modelos que actualmente se utilizan consideran dominios unidimensionales, bidimensionales y aproximaciones a tridimensionales, intentando reproducir la realidad física de los fenómenos.

En los epígrafes que siguen en este capítulo, se realiza una clasificación en función del dominio que estudian, las simplificaciones que asumen y los programas que son utilizados con las características que los diferencian. Además se aporta una base documental de las investigaciones realizadas que revelan el ámbito de aplicación de los mismos.

2.3. Modelos Unidimensionales

Estos modelos se estudian en aquellos casos que el flujo tiene un marcado carácter unidireccional; pudiendo encontrarse con supuestos en los que la variación temporal no tiene gran importancia y otros en los que se considera relevante; por lo que tendremos casos en régimen permanente y no permanente.

Cuando el régimen considerado es permanente y gradualmente variado se utiliza la ecuación de conservación de la energía de Bernoulli con una serie de simplificaciones. Así, se toma un caudal de circulación constante en el dominio sin posibilidad de variación temporal, por otra parte el fondo es fijo y no erosionable siendo la distribución de presiones en una vertical la hidrostática. Uno de los métodos utilizados que emplea estas consideraciones es el “paso a paso”, que consiste en un proceso iterativo entre dos secciones del flujo del fluido mediante la ecuación de Bernoulli, tal como se expresa en la ecuación (2.1), tomada del manual del modelo HEC-RAS, donde la profundidad del flujo varía a lo largo del canal:

$$z_1 + y_1 + \alpha_1 \frac{v_1^2}{2g} = z_2 + y_2 + \alpha_2 \frac{v_2^2}{2g} + IL + \sum \lambda \frac{v^2}{2g} + \Delta H \quad (2.1)$$

siendo z la cota del fondo, y el calado, v_i la velocidad media de la corriente, g la aceleración de la gravedad, α el coeficiente de distribución de velocidades de Coriolis que se estima en cada sección a partir de la distribución de velocidades, I la pendiente motriz en el tramo entre las secciones 1 y 2, λ el coeficiente de pérdidas e ΔH las pérdidas debidas al estrechamiento o ensanchamiento del cauce [50].

El cálculo de la altura del nivel de agua se realiza a través de la ecuación (2.1) mediante un proceso iterativo entre dos secciones, aguas arriba-abajo.

Si el proceso es no permanente la resolución de los flujos unidimensionales en lámina libre se basan, en la mayoría de los casos en la resolución de las ecuaciones de Saint Venant unidimensionales (2.2) y (2.3), con las siguientes simplificaciones:

- Pequeña profundidad de la capa de agua con relación a las otras dimensiones del dominio.
- Distribución hidrostática de presiones en la vertical, pendiente de solera reducida.
- Fondo fijo.

En general los modelos 1D consideran secciones cuyos planos son perpendiculares a la dirección del flujo, tomando como parámetro la velocidad media. Además este tipo de modelos prescinden en ocasiones de la aceleración local y convectiva, dando lugar a la ecuación de onda difusiva, o bien pueden prescindir además del término de fuerza de presión dando lugar a la ecuación de onda cinemática (Tabla 2.1). En adelante se precisan las ecuaciones que desarrolla cada modelo. Las expresiones (2.2) y (2.3),

representan la ecuaciones de continuidad y momento tomadas del manual de usuario del HEC-RAS.

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (2.2)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} \right) + gA \frac{\partial h}{\partial x} = gA(S_0 - S_f) \quad (2.3)$$

donde Q representa el caudal circulante, A el área de la sección, S_0 la pendiente del canal y S_f la pendiente de fricción.

Cuando no se considera ningún modelo de turbulencia, lo cual es muy común en modelización de flujo en canales, la disipación de energía debida a las tensiones efectivas se puede suponer que se incluye en la pendiente de fricción [51].

A través de la elección de dos secciones de control aguas arriba y aguas abajo, y por medio de los datos de altura y caudal los modelos resuelven la altura de lámina libre en distintas localizaciones [52].

Ecuación	$\frac{\partial Q}{\partial t}$	$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} \right)$	$gA \frac{\partial h}{\partial x}$	$gA(S_0)$	$gA(S_f)$
	Aceleración local	Aceleración convectiva	Fuerzas de presión	Fuerzas de gravitacional	Fuerzas de Fricción
	Términos inerciales				
Onda dinámica	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí
Onda difusiva	No	No	Sí	Sí	Sí
Onda cinemática	No	No	No	Sí	Sí

Tabla 2.1 Términos de la ecuación de movimiento de Saint Venant

Ejemplos de modelización en una dimensión son los citados a continuación.

a) Hydrologic Engineering Centers-River Analysis System. HEC-RAS.

Para el análisis de flujo unidimensional el modelo hidráulico más ampliamente empleado es el HEC-RAS (Hydrologic Engineering Centers—River Analysis System), pertenece a la familia del software del mismo nombre y fue desarrollado por la USACE (United States Army Corps of Engineers) [53], de uso libre, abarca la modelización de flujo en régimen permanente, no permanente, transporte de sedimentos y análisis de calidad de aguas, empleando el método de volúmenes finitos implícitos.

La versión unidimensional de este modelo, HEC-RAS 1D, se aplica fundamentalmente en el estudio de flujos en ríos o canales, no en vano su acepción "RAS" -River Analysis System-, revela su objetivo principal, evaluar el riesgo de las inundaciones, trasvases, presas, esclusas u otro orden de simulación hidráulica.

Como características diferenciadoras se ha de señalar que resuelve las ecuaciones de onda dinámica o bien las ecuaciones de onda difusiva. Por otra parte la discretización geométrica se realiza a través del módulo HEC-GeoRAS, refinándose una vez exportadas al modelo HEC-RAS [50].

A continuación se reseñan estudios e investigaciones llevados a cabo con este modelo:

Fernández Suárez D. et al. [54] estudiaron la desembocadura del río Nalón (Asturias), evaluando los emplazamientos en los que se producen las velocidades máximas de flujo con el objeto de cuantificar el potencial energético neto.

Alireza Pilpayeh et al. desarrollaron un estudio en el río Aras (Irán) analizando el comportamiento del flujo y la altura que alcanza la lámina libre al atravesar las esclusas construidas, con el objetivo de mejorar el control y operatividad de las mismas [55].

Luis M. Timbe et al. estudiaron el fenómeno de las inundaciones en la subcuenca del río Burgay (Ecuador). El área ocupa una superficie de 447 km², analizando a través de los caudales la velocidad del flujo, y por otra parte el nivel y área que se ve sometida a la inundación [56].

Parviz Kardavani et al. evaluaron las inundaciones en el río Ay-Doghush River (Irán). Para ello utilizan el sistema GIS con el objetivo de analizar la información geográfica en 4 km de su cauce [57].

Ahmad ShahiriParsa et al., estudiaron el río Sungai Maka en el distrito de Kelantan (Malasia), con el propósito de evaluar y predecir el flujo con el objeto de tomar decisiones futuras en el entorno del río [58].

Ahmad Hosseini et al., analizaron la influencia de las mareas sobre la carretera que une las ciudades de Bushire y Borazjun (Irán). El dominio abarca una superficie de 60 km² y se extraen consecuencias de la altura de la marea en función del tiempo, y la posible interferencia de las mismas sobre la infraestructura de comunicación [59].

b) MIKE 11

Este programa tiene otras versiones, que en adelante se describen, como el MIKE 21, bidimensional y MIKE 3, tridimensional, [60], desarrollados por DHI, Instituto Hidráulico Danés. El software estudia flujos hidrodinámicos, medioambientales y ecológicos. Para ello utiliza el esquema de diferencias finitas implícitas, para el cálculo de flujos no estacionarios en ríos y estuarios.

El desarrollo de la simulación puede llevarse a cabo mediante las ecuaciones de onda difusiva u onda cinemática [52]. Por lo que se refiere a la discretización espacial el software MIKE11 malla la superficie en el plano de la lámina libre mediante el algoritmo propio FEFLOW, discretizando superficies costeras o extensiones de inundación [61].

A continuación se reseñan estudios e investigaciones llevados a cabo con este modelo:

Davoud Khodadadi Dehkordi y Heidar Ali Kashkuli, llevaron a cabo el estudio hidrodinámico del río Great Zohreh uno de los cinco más importantes de la provincia del Khuzestan (Irán). Se analizaron un total de 366 km, con el objetivo de gestionar la descarga de los diferentes afluentes del río [62].

Mirela-Alina Sandu y Ana Virsta, estudiaron la cuenca hidrológica del río Argesel (Rumania) en una superficie de 242 km², el objetivo consistió en evaluar las variables en el tiempo y en el espacio que son responsables de las pérdidas de caudal a lo largo de la cuenca fluvial [63].

B. Razdara et al., llevaron a cabo una investigación en el río Pasikhan (Irán) con el fin de analizar el uso de pesticidas y su influencia en la calidad de agua en los ríos [64].

Sina Alaghmand et al., desarrollaron un estudio comparando los dos modelos, HEC-RAS y MIKE 11. Analizaron la posibilidad de inundación del río Sungai Kayu Ara a su paso por Kuala Lumpur (Malasia). De los resultados obtenidos llegaron a la conclusión que el primero es más fiable para abordar el cálculo de lámina libre en comparación con el segundo [65].

2.4. Modelos Cuasi-bidimensionales

Diferentes fenómenos naturales como la confluencia de cauces, cruce de corrientes de agua, etc., no pueden ser abordados por la aproximación unidimensional. Para dar solución a los mismos y previo al desarrollo de la solución bidimensional se desarrollaron los esquemas cuasi-bidimensionales. Los programas antes mencionados contemplan esta solución que resuelve fenómenos de gran importancia social y económica como son los riesgos de inundación.

En este tipo de modelos se aplican las ecuaciones de Saint Venant unidimensionales en la dirección del flujo, mientras que las llanuras de inundación se representan mediante superficies adyacentes al mismo denominadas células de almacenamiento [50].

Se trataba de un modelo al que se recurría por la falta de capacidad y velocidad de los antiguos ordenadores, actualmente se utiliza si se carece de los datos suficientes para obtener un estudio batimétrico o una topografía rigurosos. Tanto los modelos HEC-RAS como MIKE 11 disponen de este esquema. A continuación se reflejan las ecuaciones que rigen este tipo de flujo, tomadas del manual MIKE 11:

$$b \frac{\partial y}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (2.4)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} \right) + gA \frac{\partial y}{\partial x} + \frac{Q}{A} q = gA [I_0 - I] \quad (2.5)$$

Donde y es el calado, Q el caudal, x la abscisa de la sección, t el tiempo, b el ancho superficial, q el afluente lateral por unidad de longitud, A el área de la sección transversal, g la gravedad, I_0 la pendiente del fondo e I la pendiente motriz.

A continuación se reseñan estudios e investigaciones llevados a cabo con este modelo:

Una comparativa de los modelos MIKE 11 y HEC-RAS fue llevada a cabo en 2013 por Mauricio F. Villazón et al., en el río Dender (Bélgica), limitando el análisis a un tramo de 5 km para evaluar las crecidas en el cauce consecuencia de la alta pluviosidad y tormentas en la zona. Como parámetros básicos de intercomparación entre los modelos se utilizó la altura máxima del nivel de agua y el caudal de descarga, llegando a la conclusión de que ambos modelos suministran datos similares, ya que la diferencia entre alturas máximas es de 5 cm y la debida al nivel de descarga es del 1-2% [66].

S.A. Brandt et al., analizaron la influencia de las riberas y las pendientes de las llanuras inundables, en la precisión de los resultados obtenidos a través de la simulación del flujo. Para ello tomaron como escenario el río Eskilstuna (Suecia) modelizando a través del HEC-RAS [67].

M.S. Horrit y P.D. Bates realizaron un estudio en el río Severn (Reino Unido) de las llanuras de inundación sufridas en los años 1998 y 2000, los datos recogidos por satélite sirven de prueba comparativa con la simulación mediante el programa HEC-RAS [68].

Aaron Cook y Venkatesh Merwade, estudiaron las llanuras de inundación en Strouds Creek (Carolina del Norte) y en el Río Brazos (Texas) mediante el programa HEC-RAS. La simulación es comparada con la proporcionada por el LIDAR (Light Detection and Ranging) llevado a cabo en EEUU con el fin de analizar las potenciales inundaciones del país [69].

Rabindra K. Panda et al. estudiaron mediante el modelo MIKE 11 el río Kushabhadra (India) en los períodos monzónicos de 5 años, evaluando los caudales y alturas alcanzadas [70].

Frezer Seid Awol et al. investigaron, mediante MIKE 11, la relación entre las precipitaciones y las escorrentías, para evaluar la producción energética de dos centrales hidráulicas situadas en el Río Danubio, en el sureste de Alemania, [71].

Lawrence Omai Muku y Gilbert Nyandwaro, llevaron a cabo una investigación en la parte baja del río Nzoia, Kenia, que se ve afectada por grandes inundaciones. Para ello simularon, mediante MIKE 11, dos situaciones: diques de contención rotos o intactos. Como consecuencia de estos escenarios se extrae la bondad de estas estructuras hidráulicas [72].

La predicción de inundaciones y alertas del río Urumea (País Vasco), mediante MIKE 11, fue llevado a cabo por Peter Torp Larsen et al.. El área total evaluada fue de 350 km², 25 km correspondientes al río. El objetivo fue reproducir el proceso de precipitación-escorrentía del río y la propagación del mismo [73].

2.5. Modelos Bidimensionales - Modelos de profundidad promediada

Como se ha indicado al principio del capítulo las ecuaciones que rigen el movimiento de un fluido newtoniano, incompresible e isótropo son las de Navier-Stokes. Estas ecuaciones son tridimensionales y no es posible su estricto desarrollo analítico; por otra parte para abordar el problema de la turbulencia se debe realizar la simulación del flujo para llevar a cabo la resolución de las ecuaciones. Uno de los métodos o técnicas actualmente más aplicado, son las denominadas ecuaciones promediadas de Reynolds Navier-Stokes (RANS). No obstante la complejidad de las mismas persiste y el tiempo de resolución puede resultar costoso, especialmente en dominios extensos. Otro factor a tener en cuenta es que se trabaja en un medio bifásico, aire-agua, lo cual supone una dificultad añadida para la simulación.

Debido a las dificultades mencionadas nacen los modelos 2D que se aplican a los flujos que tienen lugar en geometrías más complejas que las aplicadas a 1D, o bien cuando se produce la generación de recirculaciones. Ejemplo de ello son las desembocaduras de las rías o estuarios donde la velocidad del flujo no siempre es perpendicular a la sección. En estos casos se recurre a las ecuaciones denominadas “aguas someras bidimensionales promediadas en profundidad” (shallow water), en adelante denominadas 2D-SW o ecuaciones de Saint Venant bidimensionales. Estas ecuaciones provienen de la integración promediada en profundidad de las ecuaciones de Reynolds Navier-Stokes (RANS).

A diferencia de la simulación 1D que trabaja con la velocidad media y quasi-uniforme en la sección, en los modelos 2D se opera con las dos componentes horizontales promediadas en profundidad, es decir se promedian en el eje z las ecuaciones de Reynolds tridimensionales. Para ello se asume una escala espacial vertical (profundidad) mucho menor que la escala horizontal, por lo cual consideran dos aspectos, una distribución de presiones hidrostáticas y al mismo tiempo un campo de velocidad homogéneo en profundidad. Las ecuaciones (2.6), (2.7) y (2.8) representan las ecuaciones de continuidad y movimiento resultantes de las ecuaciones de Navier-Stokes promediadas en profundidad, según las expresiones y notación del modelo IBER. Esta simplificación, como se concretará en adelante, no se cumple cuando el flujo se encuentra con geometrías u obstáculos complejos [50].

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial h U_x}{\partial x} + \frac{\partial h U_y}{\partial y} = 0 \quad (2.6)$$

$$\frac{\partial h U_x}{\partial t} + \frac{\partial h U_x^2}{\partial x} + \frac{\partial h U_x U_y}{\partial y} = -gh \frac{\partial h}{\partial x} - gh \frac{\partial z_b}{\partial x} + \frac{\tau_{s,x}}{\rho} - \frac{\tau_{b,x}}{\rho} + 2\Omega h \sin \lambda U_y + \frac{\partial h \tau_{xx}^e}{\partial x} + \frac{\partial h \tau_{xy}^e}{\partial y} \quad (2.7)$$

$$\frac{\partial h U_y}{\partial t} + \frac{\partial h U_x U_y}{\partial x} + \frac{\partial h U_y^2}{\partial y} = -gh \frac{\partial h}{\partial x} - gh \frac{\partial z_b}{\partial y} + \frac{\tau_{s,y}}{\rho} - \frac{\tau_{b,y}}{\rho} - 2\Omega h \sin \lambda U_x + \frac{\partial h \tau_{xy}^e}{\partial x} + \frac{\partial h \tau_{yy}^e}{\partial y} \quad (2.8)$$

Las dos componentes de la velocidad horizontal promediada en profundidad se expresan como:

$$U_x = \frac{1}{h} \int_{z_b}^{z_s} \overline{u_x} dz \quad (2.9)$$

$$U_y = \frac{1}{h} \int_{z_b}^{z_s} \overline{u_y} dz \quad (2.10)$$

$$h = z_s - z_b \quad (2.11)$$

Donde h es el calado en cada punto del dominio estudiado, $\overline{u_x}$ y $\overline{u_y}$ son las dos componentes horizontales de la velocidad tridimensional, U_x y U_y son las dos componentes de la velocidad horizontal promediada en profundidad, z_b es la elevación del fondo y z_s es la elevación de la superficie libre. Las tensiones efectivas τ_{xx}^e , τ_{xy}^e y τ_{yy}^e , son el resultado de la integración en profundidad de las tensiones viscosas, tensiones de Reynolds y términos convectivos tridimensionales, que son consideradas para poder modelizar recirculaciones. [51]

Las simplificaciones que se consideran para el desarrollo de las ecuaciones SW-2D son las siguientes:

- Flujo incompresible.
- Hipótesis de Boussinesq.
- Campo de presiones hidrostático. Se considera que la escala en la dimensión vertical es más pequeña que la horizontal, si bien es cierto que la definición de estas escalas no es sencilla y depende de las condiciones de flujo y geometría. De esta consideración no debería desprenderse que la velocidad vertical es despreciable, como se estudiará en esta tesis.
- Se asume un comportamiento homogéneo en la dirección vertical, es decir las velocidades horizontales son uniformes en las distintas capas creadas.
- Se considera una viscosidad promedio en ciertos casos.

El método utilizado para simular la turbulencia se indica en los modelos citados a continuación. No obstante se ha de mencionar que la diferencia más notable entre turbulencia 2D y 3D reside en el hecho que en 2D no hay producción de turbulencia debida a la expansión de vórtices.

Un método usual para resolver la altura de la lámina de agua, en los modelos que operan con una sola fase, es el de inundación/secado. Consiste en discretizar el máximo área llena de agua. El mallado numérico consta de zonas mojadas y secas con una frontera definida con la interfase entre agua y tierra respectivamente. Los puntos secos y mojados se distinguen por la profundidad del agua según un algoritmo que aplica cada programa [74].

Por lo que se refiere al mallado computacional cabe la elección entre estructurado y no estructurado. Las mallas estructuradas bidimensionales se forman por elementos cuadrangulares ordenados en filas y columnas, de forma que cualquier elemento quede

perfectamente identificado por un par de índices (i, j) . La principal ventaja de las mallas estructuradas es su eficiencia desde el punto de vista numérico, tanto en lo que se refiere a la programación de algoritmos como al orden de precisión. Tienen el inconveniente de ser difícilmente adaptables en geometrías muy irregulares, como es el caso de los estuarios o rías.

Cuando la geometría es irregular se utilizan mallas no estructuradas que están formadas por elementos de geometría variada con el objeto de adaptarse al terreno.

El diseño se lleva a cabo en el plano de la superficie libre, dos dimensiones, mientras en profundidad se construyen capas que siguen distintas configuraciones en función de los modelos que en adelante se estudian.

Los tipos de modelización en dos dimensiones es amplia, se reflejan a continuación los modelos más utilizados en la actualidad.

a) HEC-RAS 2D

Este software en su última versión 5.0, versión beta, permite realizar la simulación con la ecuación de Saint Venant o la ecuación de Onda Difusiva, que no considera el término temporal ni el convectivo, resolviéndolas mediante el método de los Volúmenes Finitos Implícitos. Permite modelizar flujos subcrítico, críticos y supercríticos. Por otra parte podemos analizar las condiciones en régimen permanente y no permanente [75].

El modelo aborda la turbulencia considerando sus efectos mediante un coeficiente de viscosidad turbulenta (Eddy Viscosity Transverse Mixing Coefficient), en función de la geometría y superficie [76].

Los perfiles de la superficie se calculan evaluando secciones consecutivas y aplicando las ecuaciones de la energía y pérdidas mediante un método iterativo. [77]. Las celdas computacionales de una determinada malla, utilizando HEC_RAS, pueden ser triángulos, cuadrados, rectángulos o polígonos de hasta 8 lados como máximo. Dispone de una herramienta que crea este mallado denominada "Geometric Data" [78]. Su función es adaptarse a la geometría del dominio que se pretende estudiar por lo que es útil en zonas costeras.

En las ecuaciones puede considerarse la aceleración de Coriolis y la aportación de agua al dominio debido a lluvias o a otros cauces fluviales. Además el modelo puede dar solución a fenómenos físicos como el arrastre de sedimentos o el análisis de la calidad del agua.

A continuación se reseñan estudios e investigaciones llevados a cabo con este modelo:

Luis Cea et al., llevaron a cabo dos estudios, el primero de ellos fue el realizado en el río Louro-Pontevedra, con una superficie de 32 km², caracterizado por una malla no estructurada y régimen estacionario con el objeto de estudiar las zonas potencialmente inundables. Otra investigación, desarrollada por los mismos autores, tiene lugar en el río Lérez, desemboca en la Ría de Pontevedra, estudiando el mismo a lo largo de 1 km de longitud, donde alcanza anchuras entre 65 m y 125 m, siendo su profundidad media de 15 m. La discretización espacial se realizó mediante malla no estructurada. El objeto fue estimar la capacidad de arrastre de sedimentos del río en condiciones de avenida y su influencia sobre la evolución de la marea [50].

V. Moya Quiroga et al., analizaron la planicie de inundación de Llanos de Moxos en la Amazonia Boliviana que se ve afectada frecuentemente por el río Mamore, que anega importantes ciudades como Trinidad. Debido al desconocimiento sobre las consecuencias de la inundación llevan a cabo una simulación numérica bidimensional. A partir de esta investigación obtuvieron la profundidad de agua, velocidad del flujo y la variación de la inundación en el tiempo, además se identificaron lugares específicos donde el agua comienza a inundar la planicie [79].

S.A. Mohammadi et al., investigaron las inundaciones provocadas por el río Neka en un área residencial situada en el norte de Irán. A partir de los datos cartográficos se dividen distintas áreas en función de su uso y se cuantifican los daños, lo que conduce a mejorar los métodos de defensa contra las periódicas crecidas del río [80].

Jennifer Drake et al., analizaron las aguas subterráneas que vierten al río Swan Creek (Ontario-Canadá). El objetivo consiste en el estudio del caudal de descarga, ya que el agua tiene una temperatura óptima para el desarrollo de ecosistemas. El área elegida tiene unas dimensiones de 654 m de longitud y una anchura media de 10 m. El modelo utilizado no resulta el más adecuado, según los autores, pero identifica la posible pérdida de calidad del agua del río debido a la influencia de las aguas subterráneas [81].

D. Halwatura y M.M.M. Najim, llevaron a cabo una investigación de los vertidos en la cuenca del río Attanagalu Oya (Sri Lanka). El modelo se compara con los datos obtenidos en mediciones de campo. Los autores ven en el programa una herramienta de garantía, aunque susceptible de una amplia mejora [82].

b) IBER

IBER es un modelo bidimensional desarrollado por el GEAMA (Universidad de A Coruña) y el Instituto Flumen (UPC-CIMNE), www.iberaula.es [83]. El rango de aplicación de IBER abarca la hidrodinámica fluvial, la simulación de rotura de presas, la evaluación de zonas inundables, el cálculo de transporte de sedimentos y el flujo de marea en estuarios [84].

Resuelve las ecuaciones de Saint-Venant, incorporando la acción del viento, las precipitaciones y la turbulencia. El modelo IBER consta de 3 módulos de cálculo principales: un módulo hidrodinámico, un módulo de turbulencia y un módulo de transporte de sedimentos [75]. Todos los módulos trabajan sobre una malla no estructurada de volúmenes finitos formada por elementos triangulares y/o cuadriláteros. Por otra parte se puede realizar la geometría del modelo o bien importarla.

La altura de la superficie libre de agua se realiza mediante la técnica inundación/secado, adoptando una tolerancia, de forma que si el calado en una celda es menor a la misma se considera que esa celda está seca y no se incluye en el cálculo.

La viscosidad turbulenta se calcula mediante modelos de turbulencia específicos para las ecuaciones de aguas someras promediadas en profundidad. IBER contempla varios modelos de turbulencia promediados en profundidad en función de la complejidad de la geometría y del flujo: viscosidad turbulenta constante, modelo parabólico, modelo de longitud de mezcla y el modelo $k - \varepsilon$ de Rastogi y Rodi [85].

Para proceder al mallado se importa la geometría que el programa permite discretizar en mallas no estructuradas formadas por triángulos o cuadriláteros.

A continuación se reseñan estudios e investigaciones llevados a cabo con este modelo:

E. Bladé et al., estudiaron las zonas inundables en un tramo de río con un puente anegado, para ello se realizó una representación geométrica del cauce y los obstáculos calculando el campo de calados y velocidades en un tramo del río Sarria (Lugo). Por otra parte en el río Segre se llevó a cabo un estudio analizando la influencia de una presa aguas arriba del mismo para garantizar el caudal ecológico. Asimismo, y dentro de la preocupación social de las inundaciones, se consideró que efectos tendría una crecida del río Fluviá (Gerona) sobre una carretera próxima a su cauce, C-31, considerando diferentes escenarios y las repercusiones que tendría. También, mediante el modelo IBER, se estudió el comportamiento hidráulico de una escala de peces en escenarios variados del flujo aguas abajo, al encontrarse afectado por el nivel de la marea ya que la escala está situada cerca de la desembocadura del río [84].

En el año 2014 el Instituto Flumen y el Instituto de Ingeniería de la Universidad Autónoma de México llevó a cabo un estudio sobre la "Estimación del hidrograma de salida en una cuenca". Para ello toman en cuenta la ribera del río Grijalva (Méjico) que está sometido al mayor índice de pluviosidad del país [86].

El Consejo Insular de Aguas de Gran Canaria realizó un estudio para crear un mapa de peligrosidad y riesgo de inundación. Se obtuvieron a partir de la simulación, los riesgos a que está sometida la población, la afección a la actividad económica, así como los daños económicos que se derivan [87].

c) MIKE 21 FM

Pertenece a la familia de software MIKE en dos dimensiones, resuelve las ecuaciones RANS en aguas someras 2D-SW , utilizando el método de volúmenes finitos.

Para calcular la altura de elevación de la lámina de agua se basa en el método inundación-secado [88], "Flood and Dry", así las celdas son clasificadas como secas, parcialmente secas o mojadas. Bajo unas tolerancias y algoritmos del software se realizan los cálculos [89].

El modelo turbulento está incluido en las ecuaciones de momento. En cuanto a la viscosidad turbulenta horizontal ofrece tres opciones: no considerarla, tomarla como una constante y realizar la formulación de Smagorinsky.

Emplea un mallado que se aproxima a los denominados "mallados flexibles" a través de la herramienta del programa "MIKE Zero Mesh Generator", herramienta de generación de mallados no estructurados.

Las ecuaciones pueden considerar las fuerzas de Coriolis, la acción del viento y las precipitaciones. Dispone de varios módulos: hidrodinámico, transporte de partículas, arena y lodos.

A continuación se reseñan estudios e investigaciones llevados a cabo con este modelo:

Fergal O'Rourke et al., realizaron un estudio sobre la potencialidad de la energía marina en la costa de Irlanda, obteniendo la frecuencia de las velocidades y direcciones predominantes a lo largo de un mes lunar en dos emplazamiento diferentes: Bulls Mouth y Shannon Estuary [90].

En el año 2013 Rohit Kulkarni, publicaron la tesis "Modelo Numérico de Erosión de la Costa". En el mismo analiza el emplazamiento de la Bahía de Baydara (Rusia), que es atravesada por tuberías de gas natural. La bahía tiene unas dimensiones de 350 x 250 km y está sometida a un clima extremo, siendo su cuenca proveedora de erosión termomecánica, sufriendo a su vez el efecto de las olas. Mediante el modelo de simulación dedujeron el campo de velocidades, la dirección de las corrientes y el arrastre de sedimentos [91].

En el año 2015 Gui Fu et al., intentaron dar respuesta a la preocupación del gobierno chino en la ciudad de Sanghai, por el aumento de la demanda de agua potable debido al notable incremento de población. Para ello se centran en la influencia de la intrusión de agua salina a través del Estuario Yangtze, manejando varios parámetros: mareas, altura del nivel del agua en cada ciclo mareal y cambios de la batimetría. El modelo abarca una superficie de 98,6 km², siendo el tamaño máximo de celda de 4000 m y el mínimo de 4 m [92].

d) DELF-2D

El modelo Delf es una metodología desarrollada por Dutch Institute Deltares (Universidad de los Países Bajos), www.tudelft.nl, [93] realiza el estudio y cálculo de corrientes marinas, olas, transporte de sedimentos y calidad del agua, en dos y tres dimensiones. Utiliza el método de las diferencias finitas.

Delft 2D y 3D utilizan un modelo de turbulencia anisotrópico: la viscosidad turbulenta horizontal y vertical se tratan separadamente, para la primera se toma un valor constante mientras la vertical se obtiene por varios métodos, $k-\epsilon$ y $k-L$ entre otros. De acuerdo con la consideración de aguas someras, la turbulencia considerada es la debida al gradiente vertical de flujo horizontal. La característica que distingue el tratamiento bidimensional consiste en que la dispersión no se calcula [50].

La posición de la superficie libre se determina por el Método de la Función de Altura (Height Function Method) [94]. La altura libre se obtiene a partir de la posición de la coordenada horizontal. Cuando utilizamos el mallado Z-coordenadas, cartesiano, la posición de la superficie se obtiene a partir de una aproximación Euleriana. Cuando hacemos uso de σ -coordenadas la aproximación es Lagrangiana.

El mallado se realiza en el plano horizontal x-y, en profundidad dispone de una única capa computacional en la que resuelve las ecuaciones promediadas en profundidad [95]. Es no estructurado y puede mejorarse de forma que se puede optar por mallados más refinados en función de las características geométricas para un mismo dominio.

A continuación se reseñan estudios e investigaciones llevados a cabo con este modelo:

G. Iglesias et al., realizaron el estudio de la circulación de los flujos marinos en la Ría de Muros (Galicia-España) por medio de un modelo baroclínico, 2D, empleando una discretización Arakawa-C, mallado decalado, con un tamaño de malla mínimo de 150 x 150 m en el centro de la ría para incrementar sus dimensiones hacia la entrada de la misma. El objetivo de ésta investigación radica en el análisis del comportamiento de los flujos generados en la ría debido a su valor económico y social, llegando a la conclusión que las corrientes, los afluentes y el viento son factores determinantes para su comprensión [96].

R. Carballo et al., estudiaron el potencial energético de la ría de Muros y Noya, en una superficie de 125 km². El objetivo de esta investigación fue localizar las zonas con mayor densidad energética con el fin de localizar los emplazamientos óptimos para instalar una turbina [97].

También utilizaron este modelo A. Pacheco et al., desarrollando un trabajo en el Canal de Faro, Isla de Formosa (Portugal), para evaluar el campo de velocidades y la densidad energética, en los períodos pleamar y bajamar aprovechando la configuración morfológica de la zona [98].

En el año 2012 V. Ramos et al., presentaron un procedimiento para calcular el rendimiento de diferentes turbinas de corriente marina. El estudio fue llevado a cabo en la ría de Arosa (Galicia-España), extrayendo conclusiones sobre el tipo de turbina idónea [99].

Paolo Gyssels et al., desarrollaron tres trabajos. El primero de ellos sobre la bifurcación argentino-paraguaya del río fronterizo Picolmayo, sujeto a convenios de uso equitativo del recurso hídrico. Para ello se calculó la distribución de caudales entre Argentina y Paraguay, analizando de forma cualitativa el comportamiento de la zona en cuanto a las velocidades que se producen y zonas de recirculación.

Un segundo trabajo, estudió la dinámica hidráulica y sedimentaria en la confluencia de dos ríos: Grande y Reyes (Argentina). El tercer estudio se concentra en la simulación

del campo de velocidades de la tubería de captación, sumergida en el embalse de Río Hondo (Santiago del Estero, Argentina) con el objeto de diseñar el anclaje y protección de la estructura para determinar las inestabilidades producidas por las corrientes y acción del viento sobre la misma [100].

2.6. Modelos tridimensionales-3D

Con el objeto de responder a una aproximación más precisa se recurre a los modelos tridimensionales, de esta forma se pretende simular el comportamiento de flujo del fluido en las tres dimensiones de una manera más realista.

Todos los modelos estudiados en 3D basan su desarrollo en las ecuaciones de Reynolds Navier-Stokes, RANS. Para ello se recurre a cuatro ecuaciones:

- Continuidad.
- Dos ecuaciones de movimiento, en las que se consideran las velocidades en las dos dimensiones del plano de la superficie libre.
- Ecuación de la presión hidrostática.

Es decir este tipo de modelos emplean las ecuaciones RANS, pero la dimensión vertical del movimiento se ve sustituida por la relación de la presión hidrostática. En adelante las denominaremos: ecuaciones en tres dimensiones para aguas someras, 3D-SW, aunque se ha de subrayar que no contemplan las ecuaciones de Navier-Stokes en su forma íntegra. La expresión de las ecuaciones quedaría por tanto de la siguiente forma, según la notación del modelo Delft-3D:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (2.11)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -g \frac{\partial h}{\partial x} + v_i^H \left[\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left(v_i^V \frac{\partial u}{\partial z} \right) \quad (2.12)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = -g \frac{\partial h}{\partial y} + v_i^H \left[\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left(v_i^V \frac{\partial v}{\partial z} \right) \quad (2.13)$$

$$\frac{\partial p}{\partial z} = -\rho g \quad (2.14)$$

La turbulencia es tratada según el tipo de modelización utilizado, como se detalla en adelante en la descripción de cada software.

Las simplificaciones que se consideran para las ecuaciones 3D-SW, son:

- Flujo incompresible.
- Hipótesis de Boussinesq.
- Hipótesis hidrostática.

La técnica inundación/secado, ya explicada en los modelos bidimensionales, es la más utilizada en los modelos tridimensionales y es más precisa si operamos con σ -coordenadas que si lo hacemos con Z-coordenadas [101].

El mallado computacional, en la mayoría de los modelos, se construye subdividiendo la dimensión vertical en diferentes capas. Son las denominadas coordenadas cartesianas, o Z-coordenadas, y las σ -coordenadas. En las primeras, las capas son totalmente horizontales y el fondo se representa en forma de escalera, mientras que en las segundas el mallado vertical está formado por capas limitadas por dos planos σ , no estrictamente horizontales, que siguen la morfología del fondo marino y la de la superficie libre. El espesor de las capas depende de la distancia entre la

superficie libre y el nivel del suelo marino, siendo el número de capas constante. (Ver figura 2.1)

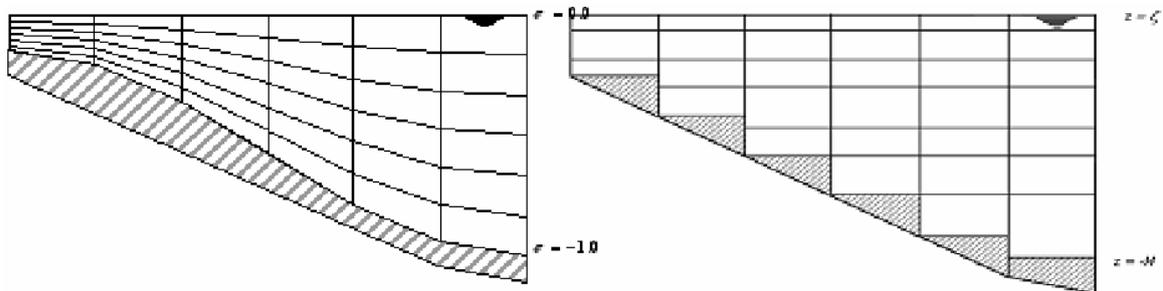


Fig. 2.1 Representación de σ -coordenadas y Z-coordenadas

a) Modelo Delf-3D

Utiliza el método de las diferencias finitas. La velocidad vertical se halla a través de la ecuación de continuidad.

El programa considera la viscosidad turbulenta horizontal constante y para el cálculo de la viscosidad turbulenta vertical (ν_t^V) dispone de cuatro opciones:

- Modelo k- ϵ .
- Modelo k-L.
- El usuario define un valor para ν_t^V constante.
- Modelo de cierre de viscosidad turbulenta algebraico (AEM).

Para el cálculo de la altura libre se basa en el análisis del volumen de control mediante el algoritmo DPSOPT, estimando el mismo si el volumen de control se encuentra lleno, vacío o con un valor promedio. El concepto adoptado es similar al método inundación/secado.

Para el mallado utiliza las dos técnicas: Z-coordenadas y σ -coordenadas. Recientemente el modelo Delf-3D incorporó una resolución aproximada, sin la simplificación hidrostática con la limitación de que solamente puede ser aplicada al mallado cartesiano. Esta solución no mejora la empleada para 2D-SW, debido a la rigidez de la técnica Z-coordenada [62] [95].

Este modelo puede tomar en cuenta la aceleración de Coriolis y evaluar el transporte de sedimentos.

A continuación se reseñan estudios e investigaciones llevados a cabo con este modelo:

V.Ramos et al., realizaron dos trabajos en la ría de Ribadeo (Asturias-España), año 2014, con el objeto de estudiar el aprovechamiento energético de las corrientes marinas y por otra parte evaluaron el impacto medioambiental de una granja de dispositivos marinos, para ello recurren a un mallado variable entre 50 m x 50 m y 50 m x 200 m [102].

F.W. Flatzek et al. expresaron en su estudio las dificultades que los modelos 3D, con mallado Z cartesiano, presentan al analizar las fuerzas de cortadura debido a las discontinuidades en el fondo marino. Para ello ponen de relieve las causas que lo provocan, proponiendo un mallado más preciso en las proximidades cercanas al fondo [103].

Otro ejemplo de estudio es el realizado por Koen Trouw et al. en la costa flamenca, donde la marea puede alcanzar los 4 m de altura, actuando las playas y costas como protección de las ciudades. El modelo tiene como objetivo analizar la influencia hidrodinámica de corrientes de marea, olas y sedimentos en el cambio morfológico de las áreas costeras [104].

V.Ramos et al., analizaron la evaluación del impacto ambiental derivado de la explotación de las corrientes marinas, considerando escenarios de invierno y verano. Este estudio se realiza en la Ría de Ribadeo (Asturias-España), que ocupa una extensión de 8,59 km². El tamaño del mallado varía en función del emplazamiento de la ría, siendo el menor de 50 m x 50 m y el mayor de 50 m x 150 m. Para la discretización vertical utilizaron las σ -coordenadas, dividiendo el dominio en 12 capas [102].

M.Sánchez et al., realizaron el estudio en la ría de Ortigueira con el objeto de analizar el comportamiento de turbinas flotantes en comparación con las fijas. El mallado varía de 50 m x 50 m a 50 m x 150 m en sentido horizontal y discretizando en el sentido vertical con σ -coordenadas mediante veinte capas. El modelo turbulento utilizado es el $k - \varepsilon$ [105].

b) Regional Ocean Modeling System (ROMS)

El código abierto Regional Modelling System and the Terrain-following System (ROMS/TOMS), www.myroms.org, [106] pertenece a los modelos numéricos tridimensionales de superficie libre adaptados al terreno. Ha sido desarrollado y apoyado por investigadores de la Rutgers University, Universidad de California, y tiene su campo de aplicación el estudio de la atmósfera y océanos.

La altura libre es calculada mediante el método inundación/secado.

Para proceder al cierre turbulento dispone de cinco métodos:

- a) El usuario define la viscosidad turbulenta y la difusividad turbulenta.
- b) Mezcla de frecuencia Brunt-Vaisala en la que el nivel de mezcla se determina en base a la frecuencia.
- c) El perfil K de parametrización.
- d) El método Mellor-Yamada.
- e) Métodos de Escala de Longitud Genéricos, que es una aproximación a los modelos de dos ecuaciones, $k - \varepsilon$ y $k - \omega$ [107].

En la coordenada vertical, las ecuaciones originales se discretizan mediante variables topográficas utilizando coordenadas extensibles, elásticas, adaptables al terreno (“terrain following”). Las coordenadas extensibles tienen por objeto aumentar la resolución en las áreas de interés, tales como la termoclina y las capas de contorno sobre el fondo. Son equivalentes a las σ -coordenadas.

El programa por defecto utiliza diferencias finitas de segundo orden, centradas, en una malla vertical escalonada definida por sigma-coordenadas.

Este modelo contempla la aceleración de Coriolis, la temperatura y el transporte de sedimentos en sus ecuaciones de gobierno del flujo.

A continuación se reseñan estudios e investigaciones llevados a cabo con este modelo:

En el año 2007 D.B. Haidvogel et al., evaluaron la dinámica de las mareas junto con el transporte de sal en el estuario del río Hudson (costa este de EE.UU). Las ecuaciones de gobierno son cartesianas en el eje horizontal (x,y) y sigma en el vertical. El modelo de cierre turbulento es solucionado con subescalas, hasta cinco, ya que el tamaño del mallado, 300 m x100 m, con profundidad media de 8 m, es demasiado grande para resolver los pequeños tamaños de los procesos de creación y disipación de la turbulencia. Se utilizan en el sentido vertical hasta 20 niveles sigma interpolando verticalmente para obtener los campos de velocidad [107].

Otro estudio fue llevado a cabo por Xiaochun Wang et al. en la Bahía de Monterrey (EEUU), donde comprobó la fiabilidad del modelo para simular las mareas internas. Para ello se sirve de 32 capas. Los autores creen necesario un mallado más fino para evaluar su objetivo [108].

El Instituto de Medioambiente de la Universidad de UCLA, desarrolló un algoritmo que mejora el modelo en lo relativo al transporte de sedimentos, aplicándolo a la costa Sureste de EEUU, en concreto Orange County (California) [109].

c) **Massachusetts Institute of Technology general circulation model (MITgcm)**

El modelo, desarrollado por Massachusetts Institute of Technology, mitgcm.org [110], aborda simulaciones numéricas climáticas, oceánicas y atmosféricas. La aplicación reseñable de este modelo, es el estudio de grandes masas oceánicas utilizando el método de volúmenes finitos para discretizar las ecuaciones en el espacio.

Puede resolver la simulación no hidrostática [111].

Considera varios modelos de ecuaciones:

- Hidrostáticas primitivas(HPE).
- Cuasi-hidrostáticas(QH).
- Cuasi no-hidrostáticas.
- No hidrostáticas(NH).

Bajo una ecuación genérica del momento cinético del fluido, en la que se consideran el transporte por advección, métrica, Coriolis y fuerzas disipativas, realiza una serie de simplificaciones.

En las ecuaciones HPE simplifica parte de la ecuación correspondiente a la expresión de Coriolis y métrica, mientras que en las QH no se consideran las fuerzas de disipación y la advección. Para la forma hidrostática son considerados todos los términos mencionados en el párrafo superior.

Ofrece dos opciones para el cálculo de la turbulencia, utilizando la técnica LES:

- Modelo Smagorinsky.
- Modelo Leith.

La altura de nivel del agua se calcula a través de modelos:

- No lineales.
- Implícitos en el tiempo (Crak-Nicholson).

- Explícitos.
- Implícitos-explícitos.

Para realizar el mallado horizontal el dominio se descompone en unidades básicas, “tiles”, de forma estructurada o no estructurada. A su vez el interior de cada unidad es una malla estructurada formada por celdas cuadrangulares. En cuanto al mallado vertical, utiliza las z-coordenadas.

A continuación se reseñan estudios e investigaciones llevados a cabo con este modelo:

J.C. Sánchez Garrido et al., estudiaron la generación periódica de ondas de gran amplitud en el Camarinal Sill (Estrecho de Gibraltar-España) diseñando mallados de distinto tamaño, en concreto los rangos varían entre los 46 m y 340 m con 53 niveles verticales debido a la complejidad topográfica marina de la zona. No adopta la aproximación hidrostática [112].

S. Sammartino et al., evaluaron en el año 2013 las corrientes marinas en la Bahía de Algeciras con el objeto de modelizar las mareas, el dominio abarca el Mar de Alborán y el Golfo de Cádiz (España). Se discretiza un volumen con una malla curvilínea oscilando las dimensiones de cada celda entre 350 m y 550 m para llegar hasta los 3 km dependiendo de la zona de estudio; el espesor del mallado vertical es variable. Adopta la aproximación hidrostática [113].

Jonathan D. Nash et al., analizaron el efecto no lineal de las olas en la franja costera desde Massachusetts hasta Carolina del Norte (EEUU). Este dominio tan amplio produce incoherencias en las predicciones de las mareas dando lugar a amplitudes y frecuencias diferentes entre dos ciclos [114].

Vasiliy Vlasenko et al., desarrollaron un estudio en el Mar Céltico (Sur de Irlanda) dado su alto interés energético. Se dispuso de una malla de 115 m y 10 capas, por medio de las cuales fue posible identificar los tipos de corrientes y olas predominantes [115].

d) MIKE 3 Flow Model (FM)

En este modelo la superficie libre se determina mediante el método inundación/secado [116].

Aborda la turbulencia, dando la opción de que la viscosidad turbulenta pueda ser especificada de forma diferente en función de la dimensión vertical u horizontal.

Así para la viscosidad turbulenta horizontal el usuario puede elegir entre:

- No existe turbulencia.
- Formulación de la turbulencia constante.
- Formulación de Smagorinsky.

para la vertical:

- No existe turbulencia.
- Formulación de la turbulencia constante.
- Formulación de la ley logarítmica.
- Algoritmo k- ϵ .

La discretización espacial de las ecuaciones de gobierno se realiza bajo el método de volúmenes finitos.

El modelo discretiza el espacio por medio de una malla flexible. En el plano horizontal se utiliza una malla no estructurada, mientras en el vertical se utiliza una malla estructurada. El mallado vertical se basa o bien en σ -coordenadas o una combinación de σ y Z-coordenadas, con elementos que pueden ser prismas o bloques cuyas caras horizontales son triángulos o cuadriláteros respectivamente.

Simula flujos no estacionarios, teniendo en cuenta la variación de la densidad, batimetría y fuerzas externas. Puede considerar también las ecuaciones de energía y de las especies para el cálculo de la temperatura y la salinidad. Por otra parte puede simular el viento mediante una base de datos suministrada por el Centro Nacional de Predicción Medioambiental (NCEP) [117].

A continuación se reseñan estudios e investigaciones llevados a cabo con este modelo:

Rucha V. Moharir et al., realizaron estudios teóricos en el Río Gota Alv (Suecia), Mar Caspio y Mar de Ariake (Japón), comprobando la versatilidad del software en cuanto a simulaciones de calidad del agua, transporte de sedimentos y circulación de corrientes [118].

Dong Woo Jang et al., estudian el sistema de circulación de agua alrededor de la ciudad de Songdo Waterfron (Corea del Sur), al objeto de realizar un anteproyecto para la construcción de un sistema de canales que recirculen el agua, y el sistema de gestión que deben tener las esclusas construidas a tal fin [119].

Rohit Goyal y Premeet Rathod, modelizan el flujo de marea proveniente de Corea del Sur, predominante en el Estrecho de Jokor. Junto con los resultados hidrodinámicos realizaron estudios de la temperatura y salinidad [120].

e) Finite-Volume Coastal Ocean circulation Model (FVCOM)

Este software desarrollado por UMASDD-WHOI, <http://fvcom.smast.umassd.edu/> [121], es una metodología de mallado no estructurado, volúmenes finitos, superficie libre, tridimensional que utiliza las ecuaciones primitivas del modelo oceánico en coordenadas cartesianas o esféricas, originario de Chen et al.. La aproximación de la presión hidrostática es una de las opciones a elegir. Pertenece a la familia de coordenadas adaptadas al terreno.

El modelo de cierre turbulento es tratado de forma diferente en la dimensión horizontal y vertical. Para la primera el usuario puede elegir un coeficiente de difusión constante o el método de parametrización de la turbulencia Smagorinsky. La viscosidad turbulenta vertical y los coeficientes de difusión térmica son tratados mediante el modelo MY-2.5 (q-ql) (Mellor and Yamada) y el k-épsilon.

Para hallar la altura de la lámina libre utiliza la técnica inundación/secado.

El mallado se lleva a cabo utilizando coordenadas de adaptación al terreno (terrain-following), similares a las σ -coordenadas, dividiendo el dominio en celdas triangulares.

También analiza el estudio de diques y estructuras bajo la aproximación hidrostática y no hidrostática y aborda modelos que tienen en cuenta la temperatura y la salinidad.

FVCOM incorpora el módulo de predicción de mareas que puede incluir hasta seis constituyentes armónicos, desarrollando modelos de olas, sedimentos y ecosistemas con opciones de parametrización de la turbulencia.

A continuación se reseñan estudios e investigaciones llevados a cabo con este modelo:

Changsheng Chen y Hedong Liu desarrollaron estudios en el Mar de Bohai, situado en la costa Noreste de China, y en el estuario del Río Satilla, Georgia-EEUU. En el mismo aplican el primer desarrollo de la metodología FVCOM en 3D y realizan la comparación con otro método, ECOM-si basado en las diferencias finitas [122].

H.S. Tang et al., realizaron estudios en las costas de Nueva Jersey, Nueva York y otros estados limítrofes, al objeto de evaluar el potencial energético, el área afectada, ponderando la cercanía a las infraestructuras más próximas de transporte energético y el impacto medioambiental. El mallado adoptado en el plano horizontal es de tipo triangular. La medida de la malla varía entre 10 m y 20 m. La velocidad en la dimensión vertical es una media en función de la profundidad [123].

Changsheng Chen et al., llevaron a cabo una simulación de las mareas en el Golfo de Maine-Nueva Inglaterra (EEUU). La resolución del mallado horizontal varía de los 500 m, a los 10 km y la discretización vertical está formada por 45 capas. La importancia del estudio radica en el estudio de la marea semidiurna más alta del planeta, con los ocho constituyentes armónicos principales [124].

Las Tablas 2.2 y 2.3, resumen las principales características de los modelos representativos de las distintas tendencias que existen en modelización, la primera describe los modelos 2D y la segunda los modelos 3D.

2.7. Programas genéricos para CFD

Los programas genéricos están diseñados para simular flujos multifásicos, transferencia de calor, cavitación y otros fenómenos. Es decir son capaces de abordar situaciones complejas como flujos de varias sustancias, superficie libre, suspensión de partículas, condensación, evaporación, combustión ó reacciones químicas.

Actualmente una gran cantidad de paquetes comerciales de software [125] se ha desarrollado, entre otros: CFX, [126] (www.ansys.com), Fluent [127] (EEUU, www.fluent.com), STAR-CD (Inglaterra, www.cd-adapco.com, www.adapco-online.com), Numeca (Bélgica, www.numeca.be) [128], FlowER [129] (Ucrania www.flower3d.org), y FlowVision [130] (Russia, www.flowvision.ru) son ejemplos de ello.

Los campos más significativos que abordan son:

- Transporte (tierra, mar y aire): predicción de la resistencia causada por el flujo de agua o aire, ventilación y seguridad y compartimentación de pasaje para la seguridad ante el fuego, simulación de combustión de combustibles en cámaras.

- Fluido mecánica: predicción de las curvas de rendimiento y modos operativos de bombas, compresores y turbinas con diferentes configuraciones de flujo, predicción de la cavitación, simulación de los procesos de fundición.

- Construcción: predicción de cargas de viento en edificios, ventilación y seguridad ante el fuego.

- Ingeniería energética: simulación de flujos de combustión en hornos y calderas de plantas de generación de energía.

- Ecología y desastres naturales: simulación de la distribución de la contaminación en el agua y en el aire, simulación expansión de fuego en bosques y ciudades.

Este tipo de métodos, llevan a cabo el análisis computacional de los flujos de líquidos y gases mediante la solución numérica de la ecuación de continuidad y las ecuaciones de Navier-Stokes (para flujos turbulentos, ecuaciones de Reynolds) que describen los movimientos del medio fluido. Algunas de las investigaciones llevadas a cabo se citan a continuación por su interés y versatilidad.

Syed Shah Khalid et al., desarrollaron un estudio del aprovechamiento energético de las turbinas de eje vertical, para ello realizaron una modelización a través del programa Start-CD con el que estudian las condiciones de diseño óptimas y los rendimientos obtenidos por la turbina [131].

Alexey N. Kochevsky describió algunas de las aplicaciones del programa CFX para simulaciones de flujos internos en canales: flujos en difusores con acusados ángulos internos, flujo en un canal de sección cuadrada que forma un ángulo de 180 grados y flujo en un canal rotativo [132].

B. Guo et al., desarrollaron, a partir de los programas Ansys-CFX y Numeca, una metodología para predecir el rendimiento hidrodinámico de una turbina [133].

Thomas P. Lloyd et al., llevaron a cabo una investigación sobre el comportamiento de una turbina en un túnel de viento mediante OpenFOAM. El objetivo consiste en establecer la forma del mallado para simulaciones en régimen no estacionario de turbomáquinas con posibilidad de otras aplicaciones como la interacción entre barco y hélice [134].

Fluent

Este modelo que desarrolla la simulación el problema propuesto en esta tesis, puede llevar a cabo simulaciones de flujos de fluidos y transferencia de calor en geometrías bidimensionales y tridimensionales.

El programa Gambit actúa como preprocesador del mallado que puede ser estructurado y no estructurado en dominios 2D y 3D. En el primero mediante triángulos y cuadriláteros y en 3D tomando como base tetraedros, hexaedros, pirámides o poliedros como se refleja en la figura 2.3. También se pueden diseñar mallados híbridos con la posibilidad de refinar la malla.

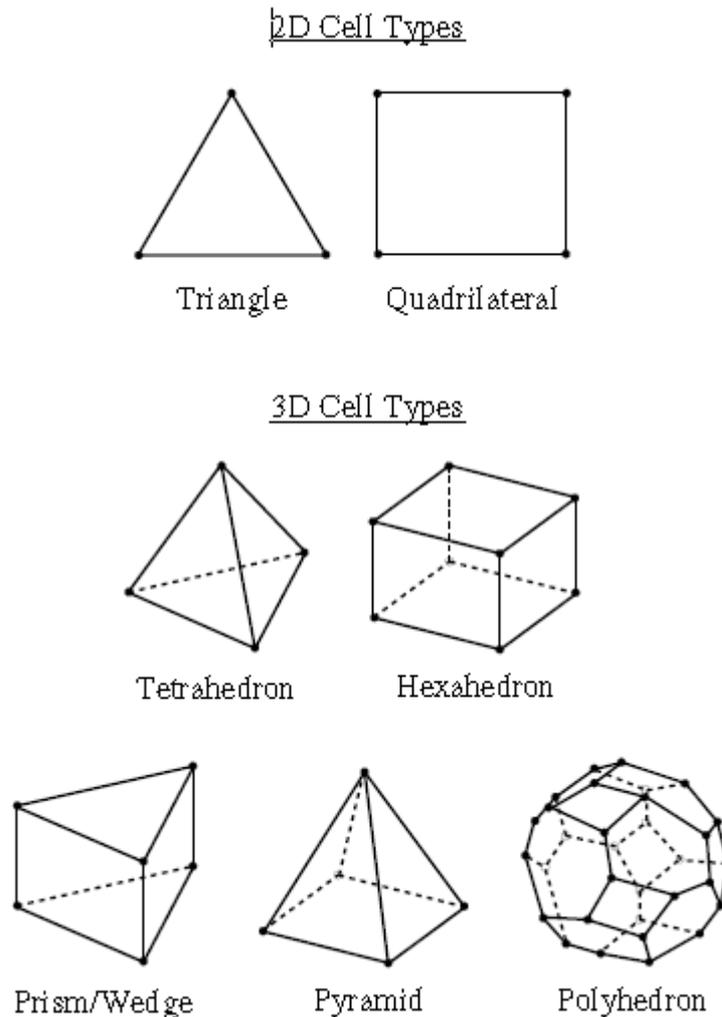


Fig. 2.2 Elementos geométricos base de un mallado

Fluent importa el modelo geométrico creado por Gambit, asignando las condiciones de contorno, definición de propiedades de los fluidos, ejecución del programa y postproceso de los resultados.

En cuanto a la dimensión geométrica, Fluent resuelve flujos en dominios:

- 2D plano.
- 2D axisimétrico.
- 2D con simetría rotacional.
- 3D.

Aborda flujos:

- Estacionarios o no estacionarios.
- Laminar o turbulento.
- Compresible o incompresible.

Los fluidos pueden tener comportamiento newtoniano o no newtoniano.

La simulación de la turbulencia se puede llevar a cabo a través de distintos modelos basados en las técnicas:

- LES (Smagorinsky-Lilly, WALE,...).
- RANS (Spalart-Allmaras, k- ϵ , k- ω , ...).
- RANS/LES Híbridos (DES, WMLES).

La superficie libre es calculada a través de la técnica Volumen de un fluido (VOF) que se especifica en el Capítulo 3 [135] [136] [137].

Otras aplicaciones de Fluent es la modelización en campos como:

- Transferencia de calor en turbomáquinas.
- Combustión.
- Cavitación.
- Aplicaciones en fusión y solidificación.
- Acústica para la predicción de ruidos generados por flujos.
- Aerodinámica.
- Flujos en bombas, compresores y ventiladores.

MODELOS 2D	Modelo numérico	Esq. numérico	Turbulencia	Altura lámina agua	Mallado
HEC-RAS	SW-2D	V.F.	Valores tabulados	Secciones de control	Estructurado/ No estructurado
IBER	SW-2D	V.F.	<ul style="list-style-type: none"> • Viscosidad turbulenta constante • Modelo parabólico • Modelo de longitud de mezcla • Modelo k-ε . 	Inundación/secado	No estructurado
MIKE 21 FM	SW-2D	V.F.	<ul style="list-style-type: none"> • No se considera • Constante • Smagorinsky 	Inundación/secado	No estructurado
DELFT-2D	SW-2D	D.F.	Modelo anisotrópico	Método de la función de altura	No estructurado

Tabla 2.2 Modelos de simulación 2D

Modelos 3D	Modelo numérico	Esq. numérico	Turbulencia	Altura lámina agua	Simplificaciones: Aprox. Hidrost./ Boussinesq	Mallado Horizontal/Vertical
DEL3D	SW-3D	D.F.	Modelo anisotrópico	Inundación/Secado	Sí σ -coord./Sí Sí Z-coord./Sí No Z-coord./Sí	Estructurado curvilíneo ortogonal/ σ -coordenadas y Z-coordenadas
ROMS(*)	SW-3D	D.F.	<ul style="list-style-type: none"> Definida por el usuario Brunt-Vaisala Peril K Mellor-Yamada Aprox a $k-\epsilon$ y $k-\omega$ 	Inundación/Secado	Sí/Sí	Estructurado curvilíneo ortogonal/ σ -coordenadas
FVCOM	SW-3D	V.F.	Modelo anisotrópico	Inundación/Secado	Sí/No	No estructurado/ σ -coordenadas
MITgcm	SW-3D	V.F.	<ul style="list-style-type: none"> Modelo Smagorinsky Modelo Leith 	<ul style="list-style-type: none"> no lineales implícitos en el tiempo (Crak-Nicholson), explícitos implícitos-explícitos 	<ul style="list-style-type: none"> Hidrostáticas primitivas(HPE)/Sí Cuasi-hidrostáticas(QH)/Sí Cuasi-no hidrostáticas/Sí No hidrostáticas(NH)/Sí 	Estructurado curvilíneo ortogonal/Z-coordenadas
MIKE 3 FM (Flexible Mesh)	SW-3D	V.F.	<ul style="list-style-type: none"> No existe turbulencia Formulación de la turbulencia constante Formulación de Smagorinsky 	Inundación/Secado	Sí/Sí	No estructurado/ σ -coordenadas y Z-coordenadas

Tabla 2.3 Modelos de simulación 3D

3. METODOLOGÍA

En este Capítulo se lleva a cabo una breve semblanza de la evolución de la CFD, como herramienta del análisis numérico que permite resolver, mediante la simulación, las ecuaciones de gobierno del flujo de un fluido.

Se describe la discretización del dominio, Ría de Avilés, y de las ecuaciones de gobierno. Debido al carácter multifásico del flujo, para resolver la interfase se elige la técnica VOF. Se especifican las condiciones iniciales y de frontera para el modelo bidimensional y tridimensional; teniendo en cuenta que el flujo tiene un carácter turbulento se elige el modelo de dos ecuaciones $k-\varepsilon$ para caracterizarlo.

Por último se indican los pasos que comprende el procedimiento de simulación.

3.1. Análisis numérico mediante la Dinámica de Fluidos Computacional (CFD)

La dinámica de fluidos computacional (CFD), Computational Fluids Dynamics, es una técnica que por medio de ordenadores simula y da solución a problemas que surgen, entre otros, en el campo de la transferencia de calor, reacciones químicas o como en el caso de la presente tesis en la mecánica de fluidos.

Mediante el empleo de los modernos computadores y gracias a su capacidad de cálculo, se logran resolver las ecuaciones de gobierno del flujo de los fluidos; labor que no es posible llevar a cabo de forma analítica, salvo en casos muy aislados en los que, además, se invierte una cantidad ingente de tiempo. No obstante es una herramienta que proporciona soluciones que deben acompañarse con estudios experimentales que le den validez; es, por tanto, una rama de estudio junto a la dinámica de fluidos experimental y la teórica.

Para la resolución de las ecuaciones mediante CFD, se ha de definir el dominio mediante su geometría, mallado, modelo matemático que se aplica, condiciones de contorno y condiciones iniciales.

La estrategia consiste en discretizar el dominio continuo en el que residen las variables, de esta forma se genera un número de puntos que una vez unidos de manera conveniente dan lugar al mallado. Los modelos transforman las ecuaciones diferenciales en algebraicas y resuelven las ecuaciones de gobierno y turbulencia en la malla generada. Una de las consignas para llevar a cabo una simulación mediante CFD, consiste en la búsqueda de equilibrio entre el coste computacional, derivado de una discretización “exigente”, y el grado de precisión requerido.

En el libro “Técnicas numéricas en ingeniería de fluidos” [138], el profesor Fernández Oro, realiza una semblanza interesante sobre la evolución de la técnica CFD que aquí se sintetiza:

Los modelos numéricos en sus comienzos, décadas de 1910 y 1920, se aplicaron al campo de la predicción meteorológica utilizando la técnica de las diferencias finitas. Más adelante, en 1933, se llevaron a cabo diversos cálculos del flujo alrededor de un cilindro; todo ello sin el empleo de ordenadores lo que provocaba una enorme cantidad de cálculos, que realizados a mano requerían una gran inversión de tiempo.

El desarrollo de los ordenadores dio lugar, en las décadas de los años 50 y 60 del pasado siglo XX al impulso de las técnicas CFD centradas fundamentalmente en el Laboratorio Nacional de Los Álamos (EEUU) [139], que desarrolló distintos métodos de resolución, comenzando en los años sesenta las primeras simulaciones acompañadas por técnicas de mallado y desarrollo de modelos de turbulencia.

En los años setenta el Imperial College (Londres) lidera las técnicas numéricas estudiando los métodos de acoplamiento de las ecuaciones de flujo y desarrollando el modelo de turbulencia $k - \varepsilon$. En esta institución nace el método de los volúmenes finitos en los años ochenta.

La importancia del desarrollo del CFD queda patente cuando se aplica en la industria aeronáutica, ya que reduce el número de simulaciones experimentales de elevado coste económico.

En los años 80 aparecen los primeros modelos comerciales, primero fue la empresa CHAM, localizada en Wimbledon (Londres), que sitúa en el mercado el

primer código: PHOENICS, que modelizaba cualquier tipo de flujo y en 1983 la Universidad de Sheffield (Inglaterra) comercializa el software FLUENT.

Otros códigos son FLOW-3D en 1985 y STAR-CD en el año 1987. A principios de los 90 salen al mercado otros productos como FIDAP, adquirido con posterioridad por FLUENT. A mediados de los 90 TASCflow se fusiona con FLOW3D para dar lugar al CFX-4 y aparecen los códigos FINE desarrollados por la empresa belga NUMECA [128].

Las grandes multinacionales del sector aeronáutico y automovilístico tales como Boeing, Airbus o General Motors y Ford comienzan a utilizar los modelos comerciales para el estudio de sus componentes y motores, ya que la simulación numérica les resulta económicamente ventajosa y ofrece más información que la experimental.

Con posterioridad todos estos códigos sufren la adquisición y fusión de las compañías que los representan en los que FLUENT se sitúa como uno de los referentes en la década de los años 90. Posteriormente ANSYS adquiere FLUENT en 2006 situándose como líder del sector.

Actualmente la CFD es una herramienta usual en cualquier proceso que requiera simular un fenómeno determinado, o analizar un tipo de flujo, siendo los campos de aplicación diversos; las industrias aeroespacial, química, electrónica, nuclear, entre otras, requieren de especialistas en el campo del desarrollo de la simulación numérica que defina los modelos e interprete los resultados.

3.2. Ecuaciones de gobierno del flujo de un fluido

La introducción de la viscosidad fue debida al ingeniero y matemático francés Claude-Luis Henri Navier (1822, publicado en 1827). La ecuación de gobierno del flujo de un fluido fue culminada por el matemático y físico irlandés George Gabriel Stokes en el año 1845 (noventa años después de la formulada por Leonhard Euler que describe la de los fluidos ideales) introduciendo el término de transporte viscoso, dando lugar a la ecuación de Navier-Stokes o ecuación de la cantidad de movimiento para flujos newtonianos [140][141].

Generalmente se expresa junto con la de energía y continuidad que a continuación se exponen:

-Ecuación de cantidad de movimiento:

$$\rho \frac{\partial \bar{v}}{\partial t} + \rho (\bar{v} \cdot \nabla) \bar{v} = -\nabla p + \rho \bar{g} + \mu \nabla^2 \bar{v} + \bar{F}_v \quad (3.1)$$

donde el sentido físico de cada término es:

$\rho \left(\frac{\partial \bar{v}}{\partial t} + (\bar{v} \cdot \nabla) \bar{v} \right)$: Variación de la cantidad de movimiento, tanto temporalmente como de forma convectiva.

$\rho \bar{g} - \nabla p + \mu \nabla^2 \bar{v} + \bar{F}_v$: Fuerzas aplicadas sobre el sistema, tanto volumétricas como superficiales (sobre las fronteras). De izquierda a derecha aparecen fuerzas

gravitatorias; presiones que se expresan en forma de gradiente para las tensiones normales y en forma de laplaciana de la velocidad para las tensiones tangenciales por ser todas las fases fluidos newtonianos, y otras fuerzas volumétricas a considerar.

-Ecuación de la conservación de la energía:

$$\rho \frac{\partial E}{\partial t} + \rho \nabla \cdot (\bar{v} E) = \nabla \cdot (k \nabla T) + \rho \bar{g} + \nabla \cdot (\bar{\sigma} \cdot \bar{v}) + \dot{W}_f + \dot{q}_H \quad (3.2)$$

Esta ecuación no es objeto de desarrollo ya que no es necesario considerar los intercambios energéticos para la resolución del problema y el método VOF no considera la temperatura como variable.

Junto con las ecuaciones mencionadas se emplea también la ecuación de conservación de la masa:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \bar{v}) = 0 \quad (3.3)$$

considerando los fluidos incompresibles, $\frac{\partial \rho}{\partial t} = 0$

la ecuación (3.3) se reduce a $\nabla \cdot (\bar{v}) = 0$ (campo adivergente).

3.3. Mallado

Como se ha mencionado el desarrollo del método de volúmenes finitos implica una discretización espacial. Es decir las ecuaciones de flujo se resuelven en una serie de puntos definidos por la malla del dominio, que está constituida por celdas, denominadas superficies en el dominio bidimensional y volúmenes en el dominio tridimensional. Cada celda está limitada por caras que están sujetas a nodos o vértices.

Para llevar a cabo el diseño geométrico y del mallado se ha utilizado el software Gambit, versión v.2.4.6.. Este programa es un módulo de pre-proceso que trabaja en un entorno tipo CAD en el que se pueden crear diversos objetos gráficos: puntos, líneas, superficies y volúmenes, así como realizar las operaciones booleanas entre ellos. Asimismo se definen las condiciones de contorno utilizadas posteriormente por el módulo de simulación [142] [143].

Para adaptar el mallado a la geometría se recurre a dos tipos de soluciones, dependiendo de la forma en que se unan los puntos que discretizan el dominio, mallado estructurado y no estructurado.

- Mallado estructurado:

Está formado por cuadrados o rectángulos, en geometrías bidimensionales, y por paralelepípedos ortogonales o curvilíneos en las tridimensionales, aplicándose a geometrías exentas de complejidades. A su vez el mallado ortogonal se puede clasificar como:

- Mallado cartesiano uniforme, se realiza en geometrías sencillas.
- Mallado cartesiano no uniforme, aunque la malla es ortogonal sin embargo no es regular en todas las direcciones.

- Mallado no estructurado:

Toma como referencia geométrica triángulos y cuadriláteros para generar las celdas. Se realiza sobre dominios cuya configuración es compleja y por tanto se requiere una adaptación al mismo, figura 3.1.

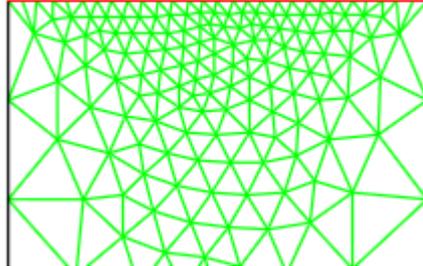


Fig. 3.1 Ejemplo de mallado no estructurado

Se puede diseñar un mallado estructurado-no estructurado para un mismo dominio. Así podemos aplicar en zonas sensibles como puede ser el fondo marino o zonas de recirculación –curvas, estrechos- un mallado diferente del que podemos aplicar en zonas con geometrías sencillas. De esta forma quedarían integrados y conectados los dos tipos de malla.

Se debe tener en cuenta la distancia entre las aristas, es decir un mallado más fino o grueso. El primero es necesario en zonas de gradiente pero conlleva un mayor coste computacional.

En cuanto a la resolución de las ecuaciones de flujo es más sencilla en el estructurado ya que dispone de un orden matricial. El no estructurado, al estar dispuesto por triángulos, dominio bidimensional, o tetraedros, tridimensional, la resolución numérica es compleja.

Algunos requisitos que debe cumplir el mallado son los siguientes:

- El paso de un tipo de mallado a otro en un mismo dominio debe realizarse de forma gradual.
- En mallados no estructurados los ángulos entre las caras no deben ser menores a 20-30 grados.
- Se debe refinar la discretización en zonas donde se espere variaciones bruscas de las variables.

A partir de la geometría se han dado los siguientes pasos:

- Definición de los puntos o vértices que definen, a tamaño real, el contorno de la geometría del dominio físico objeto de estudio.
- Definición de las líneas o caras que generan las aristas mediante la unión de los vértices.
- Definición de las superficies que contienen inicialmente la fase agua y aire.
- Diseño del mallado en celdas y espaciado entre las mismas.

- Comprobación de la bondad del mallado.
- Asignación del fluido a cada superficie.
- Especificación de las condiciones de contorno en cada una de las caras exteriores del dominio.
- Exportación del mallado y condiciones de contorno al programa de simulación FLUENT.

3.4. Discretización de las ecuaciones y resolución

Para llevar a cabo la resolución del problema, es necesario realizar una discretización de las ecuaciones diferenciales y su transformación en ecuaciones algebraicas, con el objeto de resolverlas en el mallado.

Debido a la complejidad de las ecuaciones, se procede a su linealización y a la utilización de un método iterativo. Se parte de un valor que se aproxime a la solución de forma que en cada paso o iteración, una vez fijado el criterio de convergencia, el proceso se acerque a la solución real.

La solución dependerá de:

- Condiciones iniciales, es decir estado de las variables para el tiempo inicial, $t=0$.
- Condiciones de contorno, valores que toman las variables velocidad y presión en las fronteras: paredes, entradas y salidas de flujo, etc.

Acompañando a este proceso y tratándose de un flujo multifásico, se elige la técnica VOF para resolver la interfase entre los dos fluidos, y el flujo turbulento se simula mediante el modelo $k-\varepsilon$ en su variante RNG.

3.5. Métodos para la modelización de la superficie libre

3.5.1. Modelos multifase

La existencia de dos o más fluidos considerados inmiscibles, multifase, implica una complejidad añadida para la definición del modelo numérico, ya que conlleva la existencia de una interfase que debe ser caracterizada por medio de condiciones de contorno que requieren definir su posición, movimiento e influencia sobre el flujo, para cada fase. Por ello se deben realizar tres consideraciones para obtener una simulación adecuada:

- Definir ecuaciones que describan la posición y forma de las interfases.
- Crear un algoritmo que defina la posición de la superficie libre ó lámina de agua en el tiempo.
- Aplicar las condiciones de contorno sobre las interfases definidas.

El desarrollo de modelos para resolver situaciones en las que existen interfases comenzó a mediados de los años sesenta. Se plantearon puntos de vista lagrangianos y eulerianos, en el primer caso el mallado se mueve con el fluido, mientras en el segundo el mallado permanece fijo. Por otra parte los esquemas lagrangianos no pueden resolver situaciones en los que la superficie libre se rompe o las fases intersectan entre sí.

Para los esquemas eulerianos, en función del tipo de problema objeto de estudio, se han construido modelos que se ajustan a los mismos. Por ejemplo el método de superficie en altura ("Surface Height Method"), es apropiado para flujos en canales o estudio de olas, en los que la superficie libre no se desvía en exceso de la horizontal. Posteriormente la técnica evoluciona, año 1965, con el método MAC ("Marker-and-Cell"), que identifica la posición del fluido por medio de partículas que viajan en el mismo, este método adolecía de un gasto computacional excesivo. Más adelante, año 1975, las partículas se "adjudicaban" a las superficies de los fluidos ("Surface Marker Method"). Este método no resultó satisfactorio en dominios 3D, al no poder seguir superficies alabeadas.

A principios de los 80 se desarrolló el modelo VOF (Volume Of Fluid) que resultó el más adecuado para resolver la mayoría de los casos. Se fundamenta en un campo de presiones y velocidades único (es un modelo sin temperaturas, no se plantea la resolución de la ecuación de la energía), que permite diferenciar en que zonas del dominio están las fases. Las nuevas variables indicarán cuantas fases y en que cantidad estará ocupada cada celda, por ello se puede conocer la posición de las superficies libres en el tiempo. Además podemos determinar la curvatura y pendiente de la superficie en base a la información que suministran las celdas vecinas.

No obstante presenta una serie de problemas en la resolución y precisión, por ejemplo cuando hay una gran diferencia de densidad entre las fases, generalmente líquidos frente a gases, la sensibilidad frente al campo de presiones en las fases menos densas es mayor que en las zonas líquidas por lo que dificulta la convergencia en los casos de campos de presión y velocidad acoplados.

Sin embargo el modelo VOF es la alternativa más fiable para representar los flujos multifásicos, por la simplicidad, robustez y versatilidad, siendo una de las opciones que presenta FLUENT.

3.5.2. Modelo "Volume Of Fluid" (VOF)

El modelo VOF aplicado a N fases asocia a cada celda del dominio un valor α_q de fracción de volumen, que indica por cuantas fases y en que proporción de las mismas está ocupada cada celda. Las N variables α_q son, cada una de ellas, magnitudes extensivas a las que se les puede aplicar el teorema de arrastre de Reynolds:

$$\frac{\partial \alpha_q}{\partial t} + u \frac{\partial \alpha_q}{\partial x} + v \frac{\partial \alpha_q}{\partial y} + w \frac{\partial \alpha_q}{\partial z} = 0 \quad (3.4)$$

con $q=1,2,\dots,N$; siendo ésta la expresión en un sistema de referencia cartesiano de 3 dimensiones, con un vector genérico de velocidad de componentes $\bar{v} = (u, v, w)$ y siendo a su vez el campo de velocidades único compartido por todas las fases. No hace falta evaluar las N ecuaciones, tantas como las fases, de continuidad planteadas, basta hacerlo (N-1) veces pues en toda celda se cumple que $\sum_{q=1}^N \alpha_q = 1$,

esta condición impone que en el dominio no pueden existir celdas vacías. De esta forma, no hace falta analizar la ecuación de continuidad para la primera fase pues para toda celda, el modelo impone que $\alpha_1 = 1 - \alpha_2 - \dots - \alpha_N$.

Si consideramos las fases intervinientes incompresibles y viscosas su comportamiento viene dado por la ecuación de Navier-Stokes. Se resolverá una única ecuación de momento para todo el dominio (de ahí que el campo de velocidades, como se dijo antes, vaya a ser compartido por todas las fases). La ecuación de momento depende de cada una de las fases a través de la viscosidad y de la densidad en cada celda, que son función directa de las fracciones de volumen de cada fase. Es decir:

$$\rho = \sum_{q=1}^N \alpha_q \rho_q = \alpha_N \rho_N + \alpha_{N-1} \rho_{N-1} + \dots + \alpha_2 \rho_2 + (1 - \alpha_2 - \dots - \alpha_N) \rho_1 \quad (3.5)$$

$$\mu = \sum_{q=1}^N \alpha_q \mu_q = \alpha_N \mu_N + \alpha_{N-1} \mu_{N-1} + \dots + \alpha_2 \mu_2 + (1 - \alpha_2 - \dots - \alpha_N) \mu_1 \quad (3.6)$$

Donde μ_q y ρ_q son las viscosidades y densidades de cada una de las fases, respectivamente.

Particularizando para el caso bifásico las dos variables α_i con $i=1, 2$ (aire y agua), $\bar{v} = (u, w)$, para toda celda el modelo impone que $\alpha_{aire} = 1 - \alpha_{agua}$

Además,

$$\rho = \alpha_{aire} \rho_{aire} + \alpha_{agua} \rho_{agua} \quad (3.7)$$

$$\mu = \alpha_{aire} \mu_{aire} + \alpha_{agua} \mu_{agua} \quad (3.8)$$

Siendo ρ_{aire} , ρ_{agua} , μ_{aire} , μ_{agua} , las densidades y viscosidades dinámicas de las dos fases.

El algoritmo de resolución para la ecuación (3.4) tiene que mantener la discontinuidad que presentan cada una de las funciones α_q (esto es una premisa fundamental en problemas multifásicos, donde es deseable mantener una interfase muy definida, es decir una línea de separación clara). La mayoría de algoritmos, debido a que calculan los flujos algebraicamente, tienden a extender la discontinuidad como consecuencia de los términos convectivos que manejan en los cálculos. Aún cuando se puede minimizar este efecto con el objetivo de restringir la interfase a 2 o 3 celdas, esto no encaja con el método VOF que mantiene la interfase como una discontinuidad que aparece en una única celda.

Con el objeto de lograr una interfase “controlada” se han desarrollado dos algoritmos básicos, que calculan la variación de la fracción de volumen de cada fase reconstruyendo la interfase a partir de los datos que proporciona el algoritmo VOF y calculan los flujos de fracción de volumen geoméricamente. Estos dos algoritmos son los SLIC (Simple Line Interface Method), y PLIC (Piecewise Linear Interface Calculation) que permite una reconstrucción por pendientes.

El programa Fluent implementa en su código el algoritmo PLIC como el modelo “VOF-Georeconstruct” y es el más adecuado para conseguir una buena representación de la geometría adoptada por las interfases.

El esquema por “reconstrucción geométrica” representa la interfaz entre los fluidos utilizando una interpolación lineal entre los valores de las caras de celdas adyacentes. Se puede aplicar a esquemas no estructurados y se acepta que la interfase entre dos fluidos tiene una pendiente plana dentro de cada celda tridimensional (pendiente lineal en celdas bidimensionales), utilizándose esta hipótesis para calcular los términos convectivos del flujo a través de las caras de las celdas.

El primer paso en este modelo de reconstrucción es calcular la posición de la interfase plana ó lineal con relación al centro de cada celda que está parcialmente llena de fluido, utilizando para ello la fracción de volumen de la fase considerada y sus derivadas en dicha celda. El segundo paso es calcular la cantidad de flujo de convección que atraviesa cada cara de la celda, usando la posición de la interfase calculada y la información sobre las velocidades tangenciales y normales en las caras. El tercer paso es calcular la fracción de volumen en cada celda mediante el balance de flujos entrantes y salientes a la celda calculados en el paso anterior [144].

3.6. Modelo de turbulencia

La caracterización del flujo turbulento de un fluido, debido a su comportamiento aleatorio y caótico, no puede llevarse a cabo mediante el análisis matemático.

Sin embargo al analizar la velocidad se observa que su media, \bar{u} , y la media de la fluctuación cuadrática, $\overline{u'^2}$, son variables estadísticas que reproducen este fenómeno.

Al descomponer la variable velocidad en su valor promedio y la parte fluctuante, $u = \bar{u} + u'$, e introducirla en las ecuaciones de Navier Stokes éstas se convierten en las ecuaciones RANS que describen la evolución de las variables

promediadas a las que se suma las “fluctuaciones turbulentas o tensiones de Reynolds”.

Si sustituimos los valores instantáneos de las variables por sus valores medio y fluctuante en la ecuación (3.1) y (3.3), obtenemos las ecuaciones (3.9) y (3.10):

$$\frac{\partial \bar{\rho}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \bar{\mathbf{v}}) = 0 \tag{3.9}$$

$$\underbrace{\frac{\partial \bar{v}_i}{\partial t}}_{\text{Temporal}} + \underbrace{\nabla \cdot (\bar{v}_i \bar{v}_j)}_{\text{Convectivo}} = - \underbrace{\frac{1}{\rho} \nabla \bar{p}}_{\text{Fuente (presión)}} + \underbrace{\nabla \cdot (v \nabla \bar{v}_i)}_{\text{Difusivo}} - \underbrace{\frac{1}{\rho} \nabla \cdot (\rho \overline{v'_i v'_j})}_{\text{Tensiones de Reynolds}} \tag{3.10}$$

Desarrollando las componentes de la ecuación anterior:

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \nabla \cdot (\bar{u} \bar{\mathbf{v}}) = - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x} + \nabla \cdot (v \nabla u) + \left[\begin{array}{ccc} \frac{\partial \bar{u}'^2}{\partial x} & \frac{\partial \bar{u}' v'}{\partial y} & \frac{\partial \bar{u}' w'}{\partial z} \end{array} \right] \tag{3.11}$$

$$\frac{\partial \bar{v}}{\partial t} + \nabla \cdot (\bar{v} \bar{\mathbf{v}}) = - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial y} + \nabla \cdot (v \nabla v) + \left[\begin{array}{ccc} \frac{\partial \bar{u}' v'}{\partial x} & \frac{\partial \bar{v}'^2}{\partial y} & \frac{\partial \bar{v}' w'}{\partial z} \end{array} \right] \tag{3.12}$$

$$\frac{\partial \bar{w}}{\partial t} + \nabla \cdot (\bar{w} \bar{\mathbf{v}}) = - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial z} + \nabla \cdot (v \nabla w) + \left[\begin{array}{ccc} \frac{\partial \bar{u}' w'}{\partial x} & \frac{\partial \bar{v}' w'}{\partial y} & \frac{\partial \bar{w}'^2}{\partial z} \end{array} \right] \tag{3.13}$$

Tensor de tensiones de **Reynolds** (simetría diagonal: 6 incógnitas)



MODELIZAR en función de las variables promedio

sistema que contiene los promedios de los productos de las componentes fluctuantes de la velocidad denominado “tensiones de Reynolds”, que a su vez proporciona seis nuevas incógnitas al problema; aparece el “problema de cierre” en la turbulencia.

Boussinesq propuso que debería existir una relación entre las tensiones de Reynolds, τ_{ij} , y el tensor promedio de deformaciones, S_{ij} , por medio de un coeficiente de viscosidad artificial o turbulenta:

$$\tau_{ij} = -\rho \overline{v'_i v'_j} \approx \mu_t \left(\frac{\partial \bar{v}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{v}_j}{\partial x_i} \right) = 2\mu_t S_{ij} \tag{3.14}$$

Turbulent o Eddy-viscosity: Puede ser una constante o un modelo.

Por otra parte el físico francés supone que la viscosidad turbulenta, μ_t , es isotrópica, es decir la relación entre las tensiones de Reynolds y el tensor promedio de deformación es la misma en todas las direcciones.

Para llevar a cabo la resolución se debe realizar una simulación del flujo incompresible, para lo cual existen diferentes modelos que siguen la hipótesis de Boussinesq, denominados modelos lineales de viscosidad turbulenta (EVM).

El modelo más utilizado debido a su versatilidad al abordar diferentes tipos de flujos es el $k-\varepsilon$. Se basa en la modelización de dos ecuaciones de transporte para determinar la energía cinética turbulenta, k , y las escalas de longitud o tasa de disipación viscosa, ε .

Las ecuaciones que resuelven k y ε , son:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k \bar{v}_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + 2\mu_t S_{ij} S_{ij} - \rho \varepsilon \quad (3.15)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon \bar{v}_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} G_k - \rho C_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (3.16)$$

siendo,

$$G_k = 2\mu_t S_{ij} S_{ij}$$

$$\varepsilon = 2\nu \overline{s'_{ij} s'_{ij}}$$

$$s'_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v'_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v'_j}{\partial x_i} \right)$$

Las ecuaciones (3.15) y (3.16) resuelven las ecuaciones de transporte para k y ε , relacionándolas con μ_t según la relación:

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (3.17)$$

Se completan las ecuaciones tomando una serie de valores experimentales con agua y aire, para las constantes:

$$\begin{aligned} C_\mu &= 0,09 & C_{\varepsilon 2} &= 1,92 & \sigma_\varepsilon &= 1,3 \\ C_{\varepsilon 1} &= 1,44 & \sigma_k &= 1,0 \end{aligned}$$

Por tanto para incluir los efectos de la turbulencia se utilizarán, en este trabajo, las ecuaciones RANS junto con el modelo k - ε , en su variante RNG (Re-Normalisation Group) tanto para el caso bidimensional como para el tridimensional. Este modelo tiene un alto grado de precisión para flujos con recirculaciones y remolinos.

3.7. Condiciones de contorno, UDF y parámetros de resolución

Para realizar la simulación mediante métodos numéricos es necesario definir las condiciones de contorno asignadas a la geometría objeto de estudio. Se han especificado las siguientes:

- 1) Se asigna la condición "Wall" a las paredes laterales en 3D y al fondo en 2D y 3D. De esta forma se simula la capa límite, en la que el perfil de velocidades sigue una distribución logarítmica.
- 2) La parte superior del recipiente se deja abierta con la condición de contorno presión atmosférica ("Pressure Outlet"). Se ha fijado un valor de presión estable, presión atmosférica estándar (101.325 Pa).
- 3) La entrada de agua por el fondo se define como "Velocity Inlet", y reproduce el ciclo de marea, viva y muerta, a través de la "Función Definida por el Usuario" (UDF).

La función utilizada para representar la marea semidiurna viene dada por la expresión:

$$P(t) = P_0 + \left(\frac{A_p}{2}\right) \cdot \text{sen}\left(\frac{2\pi t}{T}\right) \quad (3.18)$$

$P(t)$ es la presión total aplicada a la entrada de agua, T es el período de marea, P_0 es la presión debida al nivel medio del mar y A_p es la presión debida a la amplitud de la marea que son calculadas mediante las expresiones:

$$P_o = \rho g h_0 \text{ y } A_p = \rho g h_p \quad (3.19)$$

Siendo ρ la densidad de agua de mar y g la gravedad terrestre, h_0 y A_p son la altura de referencia y la amplitud, respectivamente, para cada ciclo de marea.

Los valores utilizados son $T = 44.700$ s, corresponden a la marea semidiurna en el caso de la Bahía de Vizcaya, $g = 9,8 m/s^2$ y $\rho = 1025 kg/m^3$.

Los valores de h_0 y h_p son datos específicos suministrados por el puerto de Avilés.

En la tabla 3.1 se observa la UDF, que representa la evolución de la marea viva.

```

real dens = 1025; /* densidad del agua (kg/m^3) */
real g = 9.81; /* gravedad (m/s^2) */

h0 = 12.25; /* altura base (m) */
ah = 3.94; /* amplitud de oscilacion entre picos (m) */
periodo = 44700.; /* periodo en segundos */

p0 = h0 * dens * g; /* presion base (Pa)*/
ap = ah * dens * g; /* amplitud entre picos (Pa)*/

begin_f_loop(f, thread)
{
F_PROFILE(f, thread, position) = p0 + ap / 2.0 * sin(2. * M_PI * t /
periodo);
}

```

Tabla 3.1 Ejemplo de programación de UDF para marea viva

- 4) Parámetros físicos: En el modelo bifásico, aire y agua se consideran fluidos con densidades y viscosidades constantes. Los valores utilizados fueron densidad de $1,225 \text{ kg/m}^3$ y viscosidad dinámica de $1789 \cdot 10^{-5} \text{ kg/m}\cdot\text{s}$ para el aire, mientras que para el agua se tomó una densidad de 1025 kg/m^3 y una viscosidad dinámica de $1003 \cdot 10^{-3} \text{ kg/m}\cdot\text{s}$.

Dado que el flujo se ha considerado incompresible y la ecuación de la energía no se utiliza, es necesario un acoplamiento entre los campos de presión y velocidad. Para ello en lugar algoritmo iterativo SIMPLE utilizado tradicionalmente, se emplea el algoritmo no iterativo predictivo-correctivo PISO, que fue desarrollado para lograr una alta eficiencia en el cálculo de flujos no estacionarios.

Para la discretización espacial se emplea la metodología upwind con el esquema de opción de la presión decalada, PRESTO, en lugar del estándar, porque es más adecuado para la gradientes de presión pronunciados de los flujos turbulentos [145].

3.8. Procedimiento de simulación

Para dar solución al problema planteado en la presente tesis es necesario abordar en el proceso de simulación una serie de pasos, con el objeto de obtener los resultados deseados.

- En primer lugar se diseña la geometría, cuestión que se aborda mediante el programa Gambit, que se utilizó para las geometrías bidimensional y tridimensional.
- Se diseña el mallado para cada una de las geometrías objeto de estudio.
- Se asignan los valores a las propiedades de los fluidos, viscosidad y densidad.
- Posteriormente se introducen las condiciones de contorno: altura de referencia, amplitud de marea y período de tiempo; para un ciclo de marea semidiurna a través de la función definida por el usuario. A su vez se deben introducir los parámetros de turbulencia.

- Introducir las condiciones iniciales, donde se definen los valores de partida con los que el programa evoluciona, y procede al cálculo en los pasos temporales marcados.
- Elección de los parámetros que definen la resolución numérica iterativa, paso temporal, factores de relajación y criterios de convergencia.
- Ejecución de la simulación de los ciclos de marea viva y muerta, realizados con el programa informático comercial “ANSYS FLUENT V13.0”.
- Resultados.
- Tratamiento numérico y gráfico.
- Análisis.

4. LA RÍA DE AVILÉS

La elección de la Ría de Avilés como escenario de la simulación se hizo con un criterio práctico, su proximidad a la Escuela Politécnica de Gijón contribuye a una excelente comunicación para el conocimiento de sus peculiaridades geométricas y fluidodinámicas, además de otros extremos necesarios para el desarrollo de la tesis.

La Autoridad Portuaria de Avilés se ofreció de forma desinteresada para suministrar cuantos datos fuesen necesarios tanto de las características batimétricas de la ría como del estudio llevado a cabo por la empresa HIDTMA: "Proyecto de Gestión Ambiental de los Materiales de Dragado del Puerto de Avilés".

En este capítulo se reflejan las características hidrodinámicas y mareales de la ría, que sirven de preámbulo para las simulaciones en dos y tres dimensiones.

4.1. Características de la Ría de Avilés

La Ría de Avilés se encuentra situada en la provincia de Asturias (España) y sus aguas desembocan en el Mar Cantábrico. Se trata de un estuario natural ubicado en la zona centro occidental de la región (5° 56' O - 43° 35' N) que abarca una superficie media de 1,45 km². La marea emboca hacia la ría atravesando una sección recta denominada "Rechalda", para abordar la "Dársena de San Juan de Nieva" y la "Curva de Pachico" orientándose hacia el sur para encontrar la zona de "Fondeadero" y llegar al "Canal de Pedro Menéndez" finalizando en la "Dársena de San Agustín", la zona más próxima a la ciudad de Avilés tal como muestra la figura 4.1.

Sobre el estuario vierten varios ejes fluviales que no alcanzan los 15 km de longitud, por ello la aportación de agua dulce es muy baja estimándose en 249,3 hm³/año (Q_F) frente a un caudal mareal medio de 3423,5hm³/año (Q_M), así la relación $\frac{Q_F}{Q_M} = 0,07$, por lo que según la clasificación de las mezclas de agua establecida por Simmons en 1955 [146] caracteriza la ría en cuanto al tipo de mezcla como homogénea. Esta condición se ha verificado considerando las circunstancias de mareas vivas y muertas y los caudales de avenida y estiaje.

Por otra parte se trata de un estuario de valle fluvial inundado, dominado por rangos mesomareales de período semidiurno [147].

4.2. Datos existentes

4.2.1. Niveles de mareas

La simulación toma los parámetros y valores de mareas de la "Carta de la Serie Internacional INT 1854. Océano Atlántico Norte. Costa Norte de España. Ría de Avilés", publicada y editada por el "Instituto Hidrográfico de la Marina-Cádiz (España). Publicación junio 1992", escala 1:7.500.

En base a los datos reflejados en la Carta, correspondientes a cada zona del canal, tales como profundidad del agua, altura del manto marino así como los accidentes geográficos, se transfiere la información al programa de diseño Gambit.

La Carta Náutica suministra los niveles de mareas expresados en metros sobre el Cero Hidrográfico indicados en la Tabla 4.1.

Lugar	Lat. N	Long. W	PMMA	PMVM	PMMM	BMMM	BMVM	BMMI
Avilés	43° 35'	5° 56'	4,42	4,22	2,83	1,56	0,28	0

Tabla 4.1 Niveles de mareas. Carta Náutica INT 1852

Con estas alturas y teniendo en cuenta el calado de la ría, 10 m, se calcula la altura de referencia y la amplitud de la marea viva y muerta, reflejados en la Tabla 4.2 [148] [149].

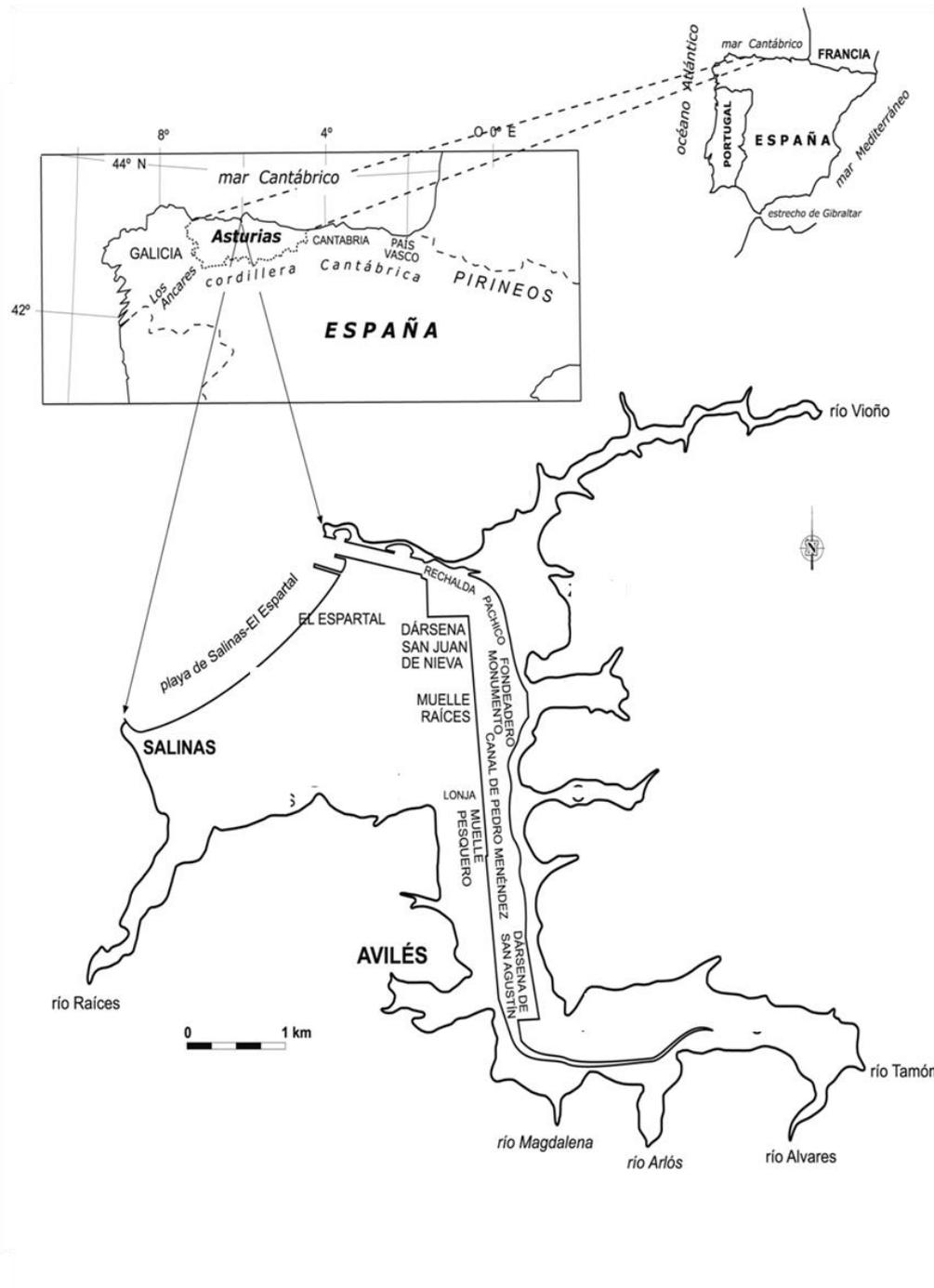


Fig. 4.1 Plano de situación de la Ría de Avilés [147]

	Altura de referencia (m)	Amplitud de marea (m)
Marea Viva	12,25	3,94
Marea Muerta	12,195	1,27

Tabla 4.2 Datos de mareas. Puerto de Avilés

Estos valores se utilizarán para definir la condición de contorno UDF, descrita en el Capítulo 3.6.

4.2.2. **Estudio hidrodinámico de la ría**

En el año 2004 la Autoridad Portuaria de Avilés llevó a cabo un estudio de la ría: “Proyecto de gestión Ambiental de los Materiales de Dragado del Puerto de Avilés”, con el fin de simular la influencia de un futuro dragado y los efectos que los sólidos en suspensión pueden tener sobre las condiciones hidrodinámicas de la misma.

En el citado documento en su Apéndice 3.1, dice: “La metodología de análisis se basa en la realización de simulaciones numéricas que permiten determinar las intensidades de corriente que se producen en el interior de la ría, lo que constituye una base sobre la que realizar el análisis en diferentes puntos de interés.”

Se llevan a cabo una serie de mediciones teniendo en cuenta que la ría está caracterizada por tres tipos de corrientes:

- Corrientes generales, siendo más influyente la denominada “Corriente del Golfo”, originada en la costa francesa y que se propaga a lo largo del litoral cantábrico hacia el oeste.
- Corrientes de marea, caracterizadas por ciclos con dirección este-oeste.
- Corrientes generadas por el viento. En este caso las direcciones predominantes son las de dirección oeste-norte.

Las corrientes generales y de marea se producen de una forma constante dentro de los ciclos característicos, mientras las originadas por el viento son de dirección cambiante y carácter ocasional. Por otra parte la corriente de mayor influencia es la debida a las mareas [150].

Con el fin de determinar los datos de corriente “in situ” se utilizó un correntímetro de lectura directa del fabricante “Space Technology Systems”, modelo DNC-3^a con el que se obtienen entre otros parámetros la velocidad y profundidad del agua.

Las medidas fueron tomadas en el período medio de carrera, en marea llenante y vaciante, sobre tres puntos representativos de la ría, obteniéndose el perfil desde la superficie al fondo.

5. SIMULACIÓN CON MODELO BIDIMENSIONAL

En el presente capítulo se describe la investigación llevada a cabo, con un modelo bidimensional de alta resolución de la Ría de Avilés, utilizando una sección definida por la longitud y profundidad. Se presenta una metodología de simulación, mediante la CFD, con el objeto de estudiar el campo de velocidades en diferentes secciones del canal para posteriormente evaluar el potencial energético de las corrientes de marea. El modelo puede ser aplicado a estuarios, rías o canales en los que la anchura y altura presenten una menor escala respecto a la longitud.

Se ha de reseñar que, frente a los modelos que simplifican las velocidades como variables promedias en profundidad (2D-SW), o en el caso tridimensional adoptando como ecuación en la dimensión vertical la simplificación hidrostática, en el presente modelo la resolución de las ecuaciones de Navier-Stokes se lleva a cabo mediante la aproximación de Reynolds.

5.1. Geometría

El modelo geométrico equivalente 2D ha sido obtenido a través de un corte longitudinal de la ría, según se detalla en la figura 5.1, ya que es la sección que mejor representa la geometría y en la que se puede observar la evolución de los ciclos de marea con mayor claridad.

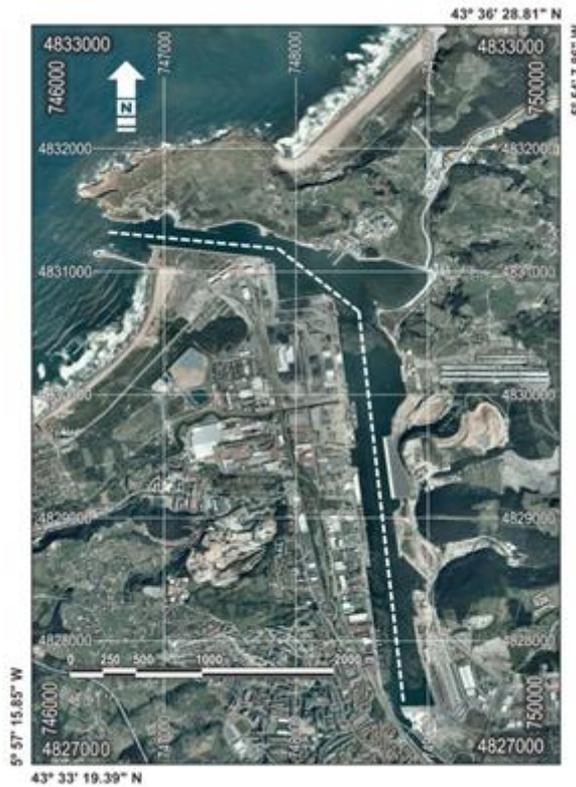


Fig. 5.1 Sección longitudinal de la Ría de Avilés

La figura 5.2 muestra las dimensiones características que definen el dominio de simulación sobre el plano de corte longitudinal. La longitud de la ría es de 5.000 m, valor que se ha tomado para definir la base del rectángulo que representa el fondo del canal; a los que se añaden en su parte izquierda, 5 m para proporcionar la entrada del flujo variable de agua que simula la marea.

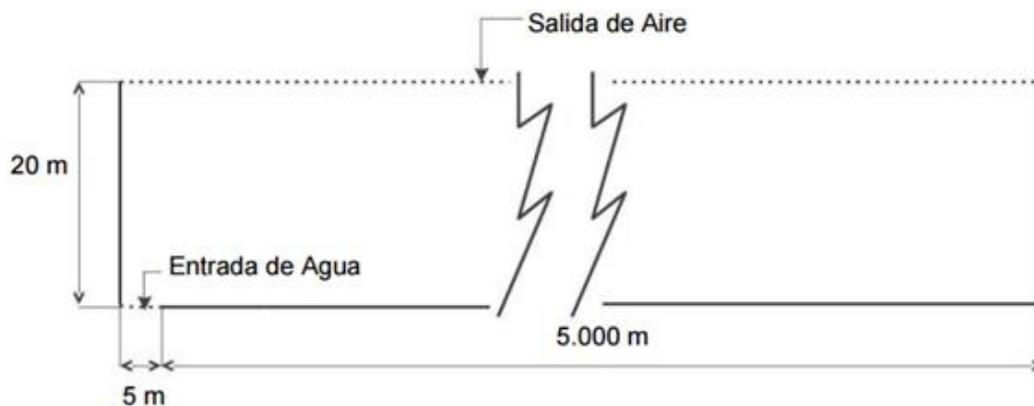


Fig. 5.2 Modelo equivalente bidimensional (2D)

Para dimensionar la altura del rectángulo se toman como referencia los valores de la Tabla 4.2, de forma que la máxima cota que alcance la lámina de agua en los ciclos de marea quede contenida en el mallado. Por este motivo, para llevar a cabo la simulación del flujo bifásico, agua y aire, se dota al rectángulo de una altura de 20 m.

El modelo se encuentra abierto por la parte superior para que el aire pueda fluir libremente en cualquier dirección.

5.2. Mallado del dominio

Teniendo en cuenta la geometría, las dimensiones y la forma esperable de la interfase se adoptó el diseño de mallado estructurado. Con ello también se facilita el desarrollo del algoritmo de cálculo PLIC. (Ver epígrafe 3.5.2)

Se llevaron a cabo diferentes pruebas de sensibilidad en función del número de celdas, con el fin de encontrar un compromiso entre una buena definición del problema y un gasto computacional asequible.

Finalmente se optó por el diseño de una malla, estructurada y cartesiana uniforme mediante rectángulos de 1 m x 0,1 m, que generaron aproximadamente 10^6 celdas. (Ver figura 5.3)

Las condiciones de contorno se encuentran especificadas en el epígrafe 3.7.

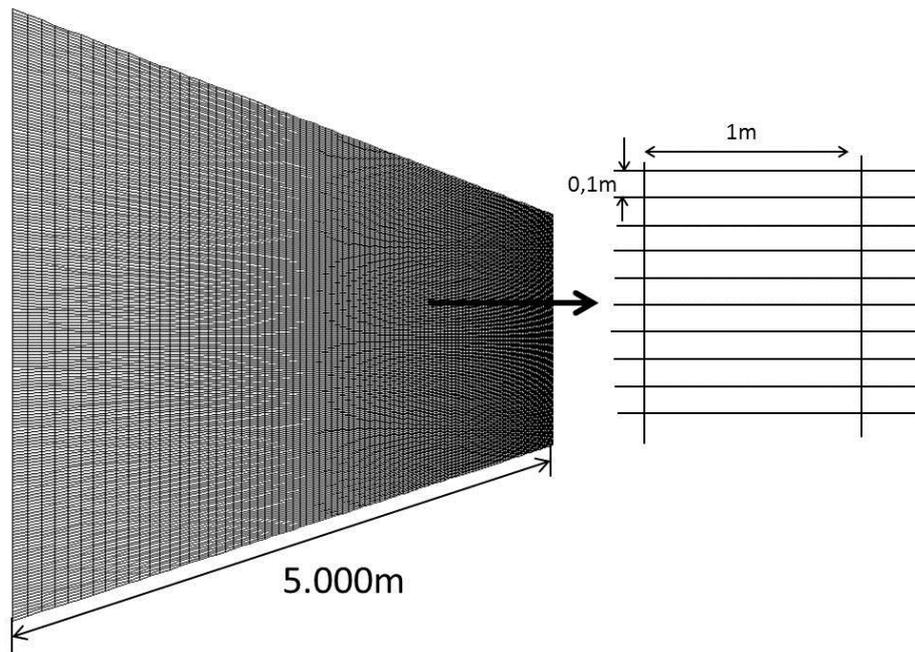


Fig. 5.3 Perspectiva y detalle. Mallado del modelo equivalente

5.3. Parámetros temporales

Se ha de fijar un paso temporal que nos garantice la convergencia del proceso de cálculo. En este caso se ha fijado un intervalo de 5 s. Como se está analizando una función periódica de 44.700 s correspondiente a una marea semidiurna se pueden

calcular el número de pasos temporales. Se han definido un número suficiente de iteraciones por cada paso temporal que garantice la convergencia de los resultados.

Tomando estos parámetros temporales se ha realizado la simulación invirtiendo, para cada simulación de ciclo de marea 7 días, por medio de un ordenador con procesador i7 con ocho núcleos trabajando en paralelo. El gasto computacional tan elevado no solamente es debido al tiempo intrínseco del ciclo de marea, período. También se origina por las ecuaciones que es necesario evaluar en cada iteración: ecuación de continuidad, ecuaciones del modelo VOF y ecuaciones del modelo de turbulencia $k - \varepsilon$.

5.4. Metodología de la simulación

Como ya se ha mencionado, con el fin de caracterizar los ciclos de mareas vivas y muertas se han programado dos Funciones Definidas por el Usuario, una para cada marea.

Posteriormente se ha ejecutado el modelo numérico durante la marea viva y la marea muerta en ciclos completos. Para evitar errores en los resultados, previamente se han simulado varios ciclos hasta que se estabilizase el flujo de agua.

Al objeto de evaluar el campo de velocidades, en la sección representativa de la Ría de Avilés se asignaron diferentes controles de paso, mediante "líneas control" cada 50 m de longitud, tal como muestra la figura 5.4, siendo identificadas por la distancia desde la boca de la ría que se toma como origen de distancias ($x=0$).

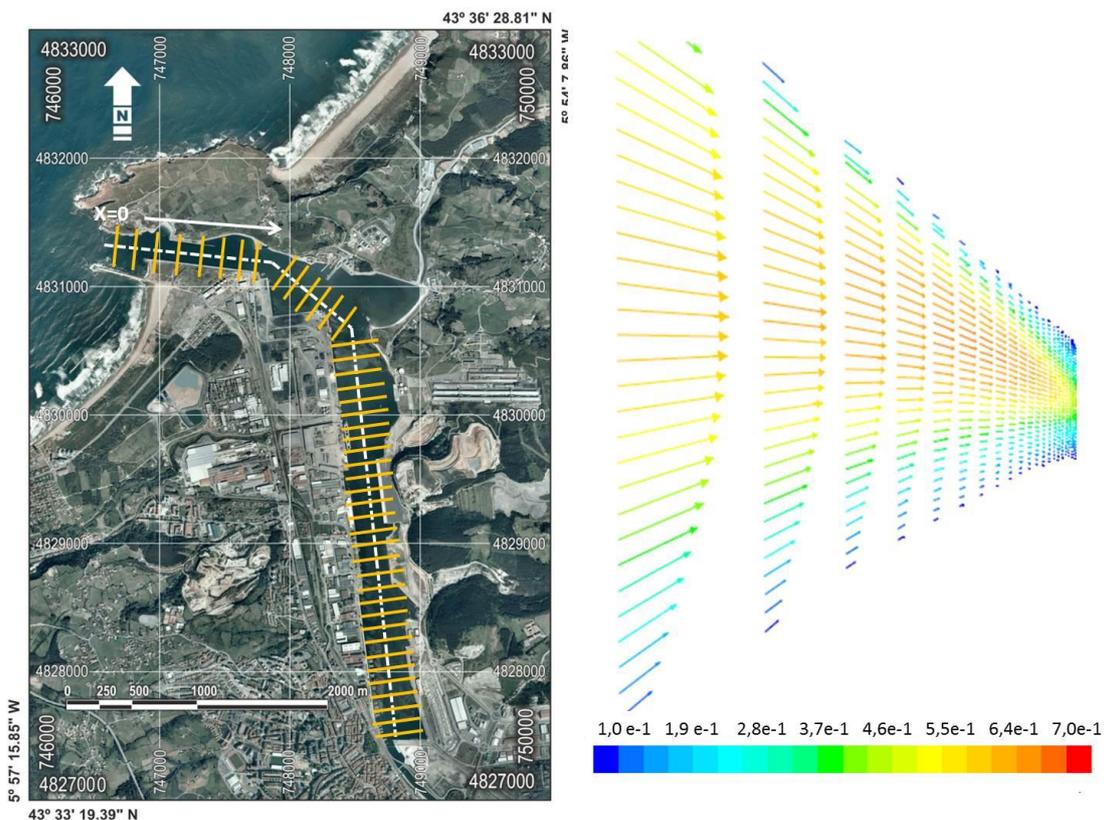


Fig. 5.4 Líneas de rastreo. Análisis del campo de velocidades

El modelo se validó comparando los resultados obtenidos en la simulación, con los valores máximos (durante un ciclo de marea) de la velocidad media del agua en una sección vertical (profundidad media) medida en el puerto.

5.5. Resultados y discusión

5.5.1. *Altura de lámina libre, velocidades máximas y validación del modelo*

Durante las dos pruebas se ha obtenido la altura de lámina libre en las diferentes líneas de control del modelo, que se corresponden con la presión de entrada aplicada. La figura. 5.5 muestra un ejemplo de la evolución durante el reflujos de marea en la prueba de marea de sicigias; es decir Sol, Luna y Tierra se encuentran alineados.

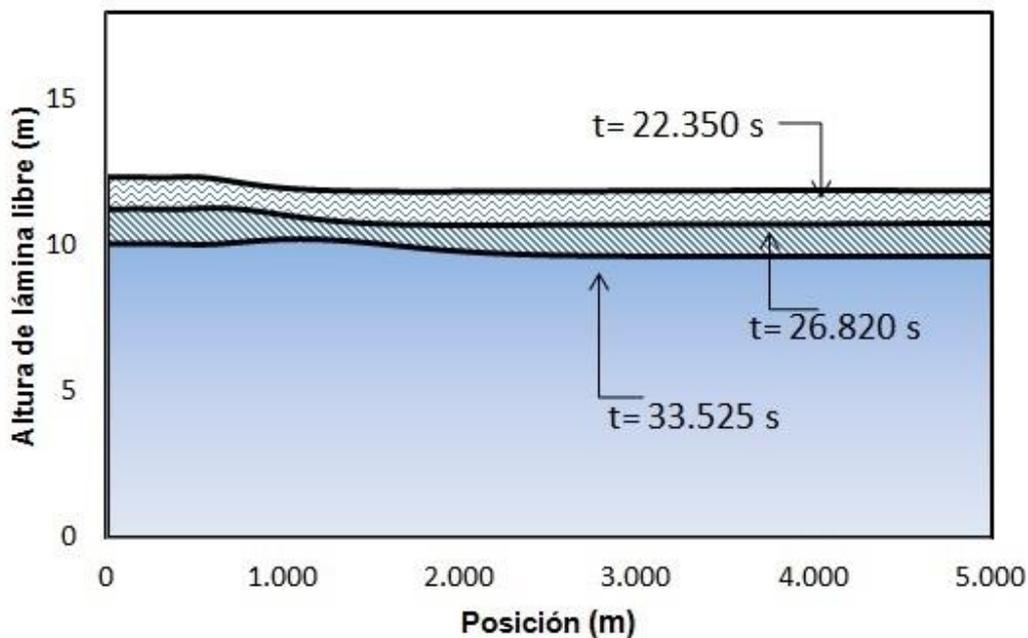


Fig. 5.5 Evolución del nivel del mar durante el reflujos de marea viva

En la figura 5.6 se muestran las velocidades medias máximas alcanzadas en las líneas de control para la simulación de marea viva y muerta. Los valores máximos alcanzados oscilan entre 0,35 y 0,4 m/s en la bocana del puerto, cayendo exponencialmente en las posiciones más alejadas.

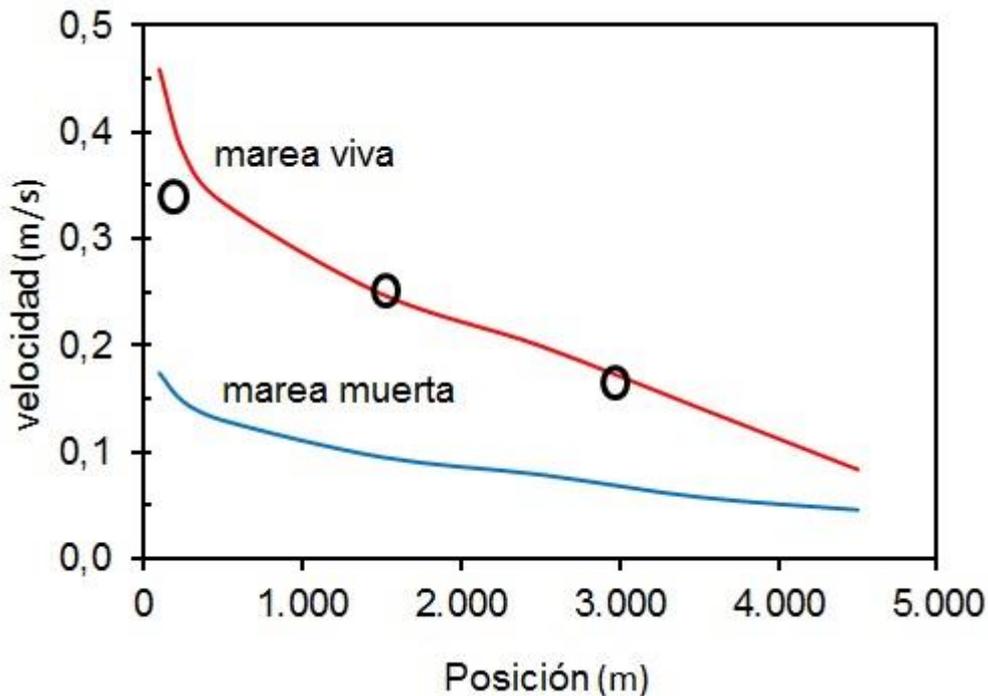


Fig. 5.6 Valores de velocidad media máxima (pruebas de marea)

Los datos obtenidos para la marea muerta muestran también velocidades medias máximas alrededor de 0,18-0,20 m/s en la entrada del puerto para decrecer exponencialmente con la distancia a medida que nos alejamos de la misma.

Los resultados tienen un alto grado de similitud con los suministrados por la Autoridad Portuaria de Avilés. Esto puede ser considerado como una validación de los datos globales obtenidos con el modelo propuesto.

5.5.2. Ciclos de velocidad

En las dos pruebas (marea viva y marea muerta), la evolución de la velocidad media por línea de control en función del tiempo, sigue una tendencia de onda coseno, que se corresponde con la derivada de la función sinusoidal de la altura de nivel de agua aplicada, tal como se observa en la figura 5.7. En la misma se observa la velocidad media del agua en la sección $x=2.500$ m y la altura de la lámina libre en función del tiempo. Como se ha comentado, el período de cada ciclo de velocidad es aproximadamente de 44.700 s, debido a la variación de la marea semidiurna. También pueden observarse el flujo y reflujos de las mareas, al igual que las fases de aceleración y deceleración.

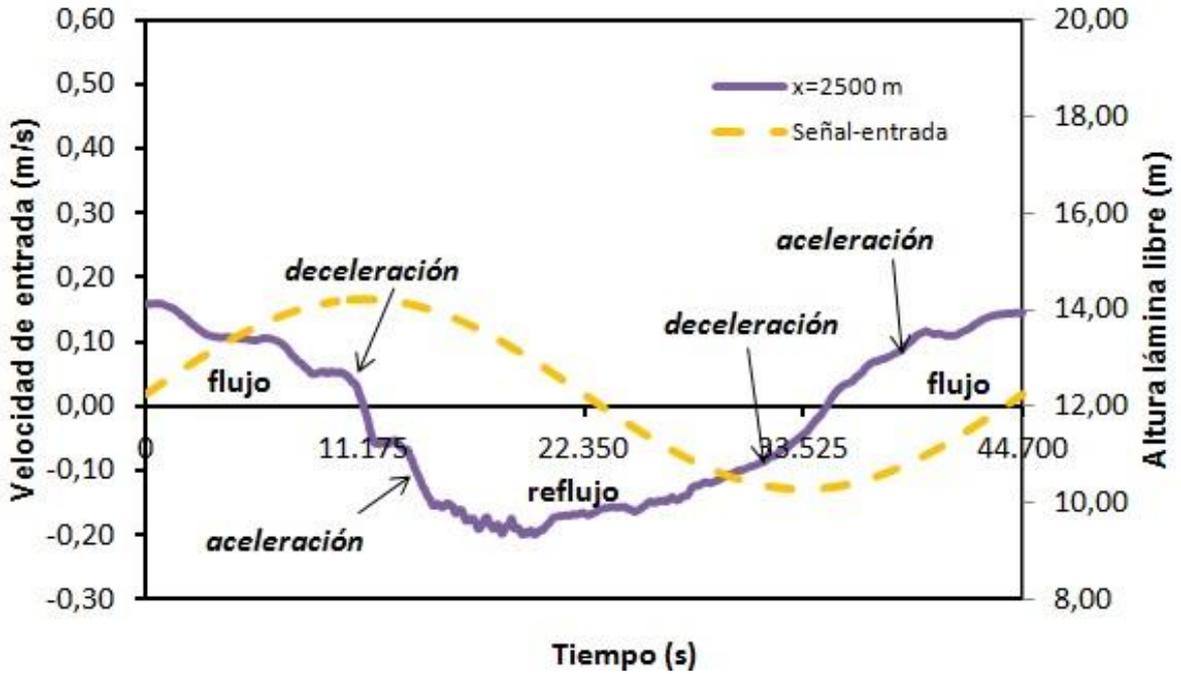


Fig. 5.7 Velocidad media del agua en la sección $x=2.500$ m vs señal de entrada

El ruido de la señal y las asimetrías entre los ciclos positivos y negativos se originan como consecuencia de las reflexiones del agua al final del puerto.

Las figuras 5.8 y 5.9 muestran los valores de las diferentes velocidades medias obtenidas que disminuyen al aumentar la distancia a la bocana de la ría.

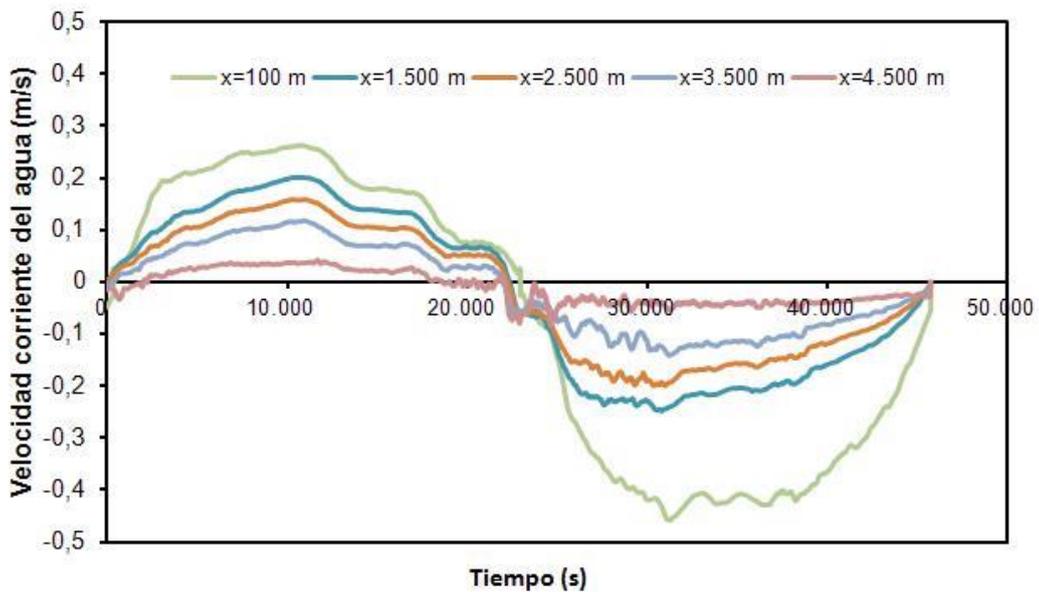


Fig. 5.8 Ciclos de la velocidad media del agua en diferentes secciones (marea viva)

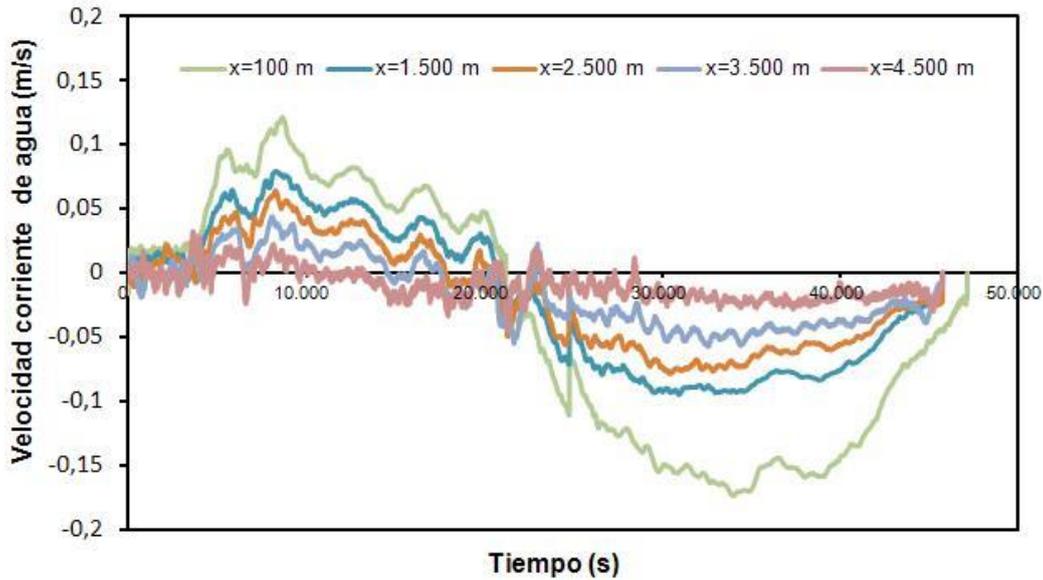


Fig. 5.9 Ciclos de la velocidad media del agua en diferentes secciones (prueba de marea muerta)

5.5.3. *Perfiles de velocidad*

El modelo proporciona los perfiles de velocidad en cada sección. La figura 5.10 muestra la secuencia completa de aceleración y deceleración en el flujo de marea y la 5.11 en el reflujó de la misma. La primera en la sección $x=100$ m, distancia a la boca del canal, y la segunda $x=2.500$ m en la mitad del canal.

En ambas figuras se puede observar que la capa límite en los diferentes perfiles se mantiene próxima al suelo del canal alcanzando una altura menor de 1 m. Puede decirse que el factor más importante e influyente en la forma de los perfiles son los procesos no estacionarios de aceleración y deceleración del agua durante el flujo y reflujó de la marea.

El valor máximo de la velocidad tiende a desplazarse hacia el suelo, lo cual se acentúa en la boca del canal (figura 5.10) mientras es menor en la zona intermedia (figura 5.11). El desplazamiento es coherente con los perfiles mostrados en [151]. Este resultado se puede pensar que está relacionado con la entrada de agua hacia la ría debido al cambio brusco de la profundidad entre el mar abierto y la boca del puerto. En el modelo, la condición de contorno se ha situado en el fondo del canal para intentar simular este efecto y ser coherente con la situación real.

Otra posibilidad que ha sido considerada, es la tendencia del proceso no estacionario de flujo-reflujó de la marea al generar un gradiente de presión longitudinal a lo largo del canal. En este caso, la elevación en el suelo del canal permanece constante, por tanto el movimiento del agua se genera por la variación del nivel de la superficie libre entre posiciones longitudinales diferentes. Durante el flujo de la marea, por ejemplo, el nivel de agua cerca de la boca del canal es mayor que en otras secciones. Como la presión superficial es idéntica en cualquier parte, esto provoca que la presión hidrostática en el suelo de la boca del canal sea más alta que en otras secciones. Esta diferencia de fuerzas longitudinales entre el fondo y la superficie (más intensa en el suelo que en la lámina libre) se cree que es la responsable de un flujo más acelerado y por tanto los valores de velocidad más altos se encuentran en el suelo. Además, este proceso es complejo debido a la variación senoidal del nivel del

mar en la entrada producida por la marea, resultando aceleraciones y deceleraciones no estacionarias.

La figura 5.10 muestra como durante el flujo de marea, en el proceso de aceleración, se acentúa la variación de velocidad con la profundidad mientras en el proceso de deceleración la variación se reduce. El mismo efecto aparece con menos intensidad en el reflujó de la marea (figura 5.11).

Los perfiles hallados difieren significativamente de los típicamente asumidos en los modelos de simulación, este hecho indica la importancia del estudio de la evolución de la velocidad en la dimensión vertical.

En la figura 5.12 se observan los perfiles de velocidad en distintas secciones de la ría para el instante de máxima velocidad durante el flujo de marea. No se produce un apreciable crecimiento de la capa límite a lo largo de la longitud del canal. Sin embargo la variación de la velocidad con la profundidad es más pronunciada en las secciones más próximas a la boca de la ría.

Se piensa que la localización de la máxima velocidad cerca del suelo del canal, es uno de los factores responsables de la reducida altura de la capa límite a lo largo del mismo.

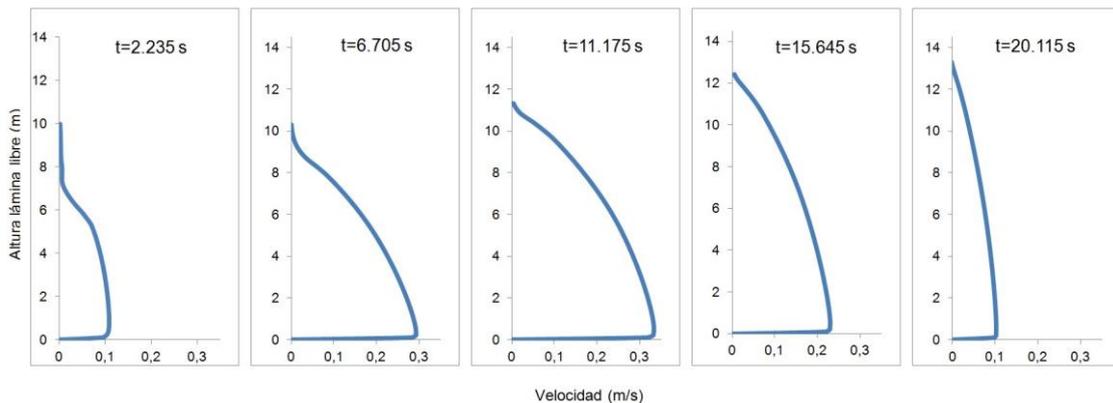


Fig. 5.10 Perfiles de velocidad durante el flujo de marea en la sección x=100 (prueba de marea viva)

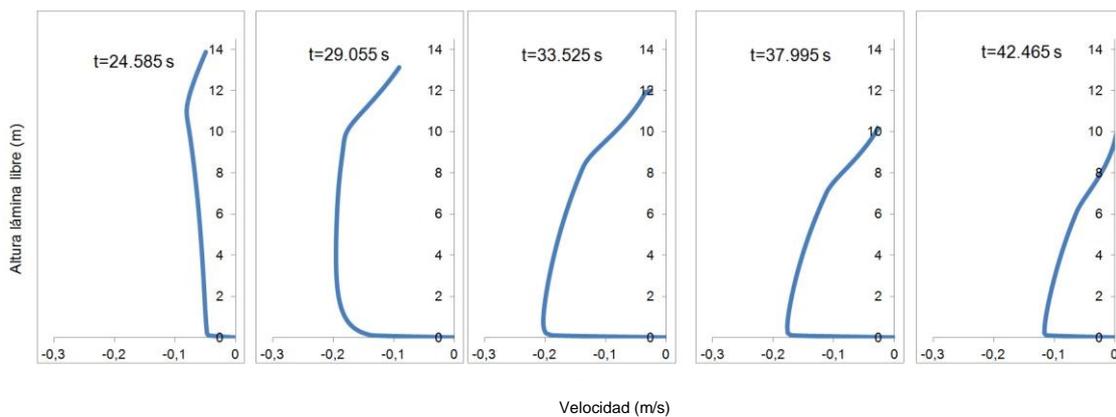


Fig. 5.11 Perfiles de velocidad durante el reflujó de marea en la sección x=2.500 (prueba de marea viva)

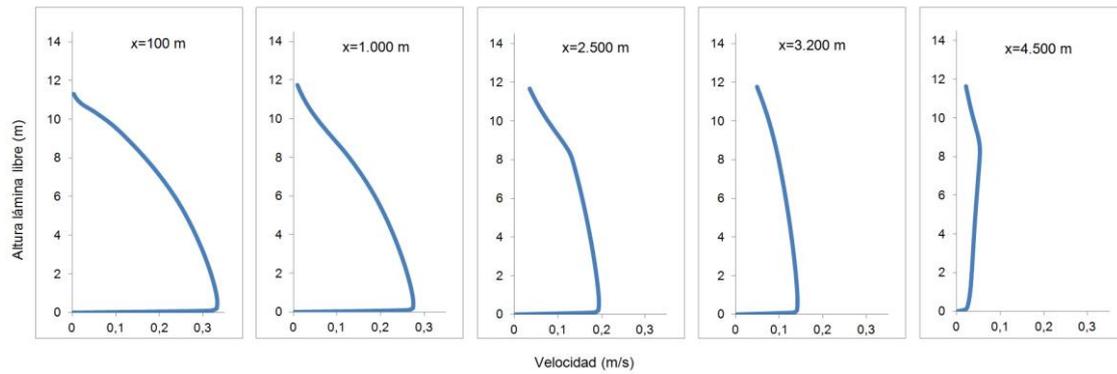


Fig. 5.12 Perfiles de velocidad durante el instante $t=11.175$ s en el flujo de marea para diferentes secciones (prueba de marea viva)

5.5.4. *Potencia y energía de las corrientes de marea*

La potencia disponible de la corriente de marea por unidad de área se calcula mediante la expresión:

$$P_i(t) = \frac{1}{2} \rho v_i^3(t) \quad [5.1]$$

Los valores de la potencia de la corriente de marea en cada sección se obtienen por medio del valor de la velocidad correspondiente a la marea viva y muerta. Las figuras 5.13 y 5.14 reflejan los valores en diferentes secciones.

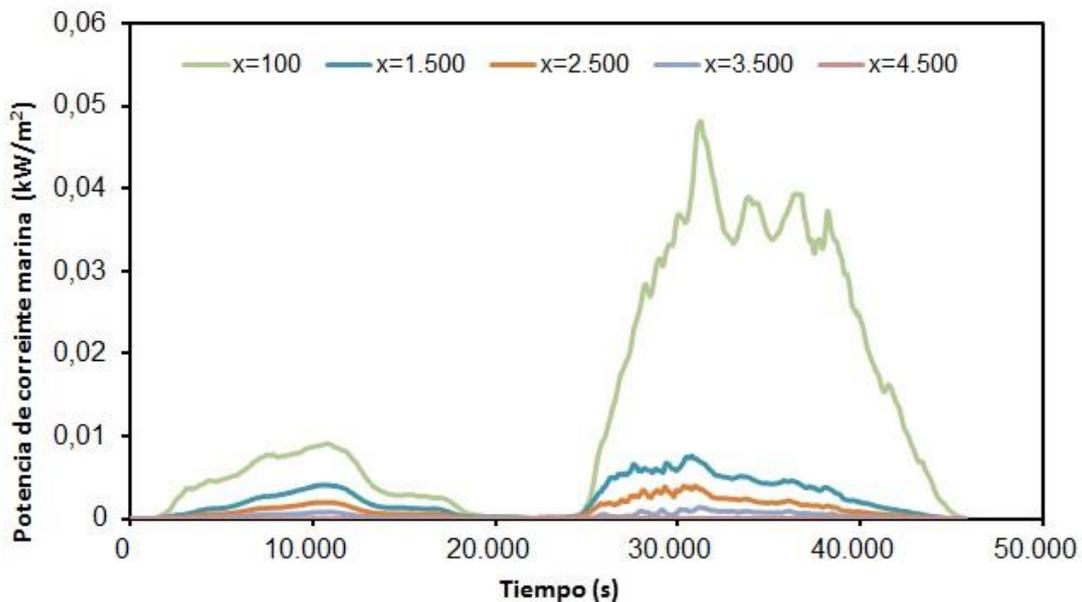


Fig. 5.13 Potencia de la corriente de marea para diferentes secciones (prueba de marea viva)

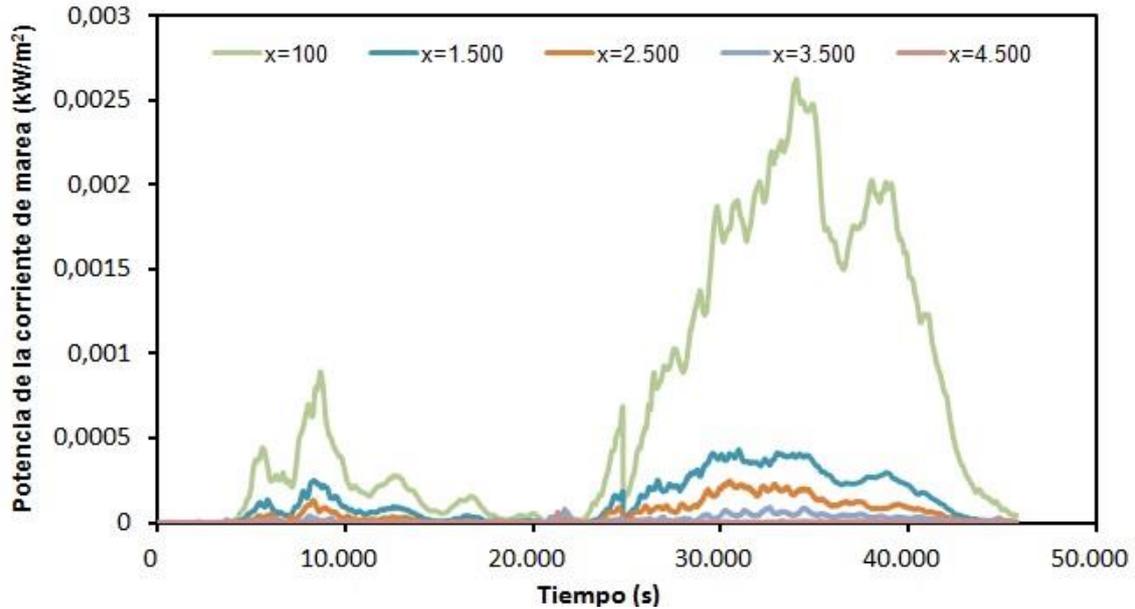


Fig. 5.14 Potencia de la corriente de marea para diferentes secciones (prueba de marea muerta)

Para cada ciclo de marea viva y muerta, la energía de corriente de marea por ciclo se calcula integrando la función potencia, como sigue en:

$$E_{anual} = E_{M_ciclo} \cdot 705 \quad (5.2)$$

Donde E_{anual} es la cantidad total de energía de corriente de marea que puede ser obtenida por m^2 en cada sección, E_{M_ciclo} es el valor medio de la energía para cada ciclo de 44.700 s. considerados como:

$$\frac{E_{ciclo_marea_viva} + E_{ciclo_marea_muerta}}{2} \quad (5.3)$$

teniendo en cuenta que, los ciclos entre marea viva y marea muerta se producen en la marea semidiurna, aproximadamente cada 7 días, y 705 es el número de ciclos por año.

La figura 5.15 muestra los resultados de la energía de corriente marina en las diferentes posiciones obtenidas con el modelo. El valor máximo, 60 kWh/ m^2 se obtiene en la boca del puerto con una disminución exponencial a medida que se incrementa la distancia a la boca de entrada.

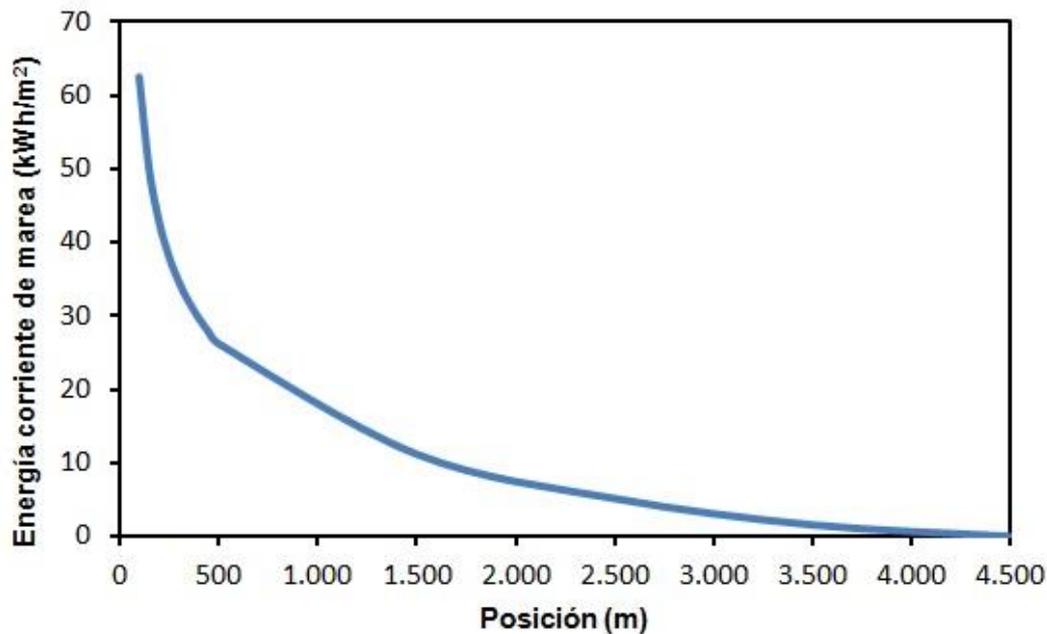


Fig. 5.15 Energía de la corriente de marea

5.6. Conclusiones

En este capítulo se ha expuesto un modelo equivalente en 2D y una metodología de estudio, con el objeto de evaluar el potencial energético de las corrientes marinas generadas por los movimientos periódicos de las mareas. El modelo utiliza una sección vertical lo que permite tener en cuenta los efectos de la profundidad.

Ambos, modelo y metodología se aplicaron a la Ría de Avilés. El mallado utiliza celdas rectangulares donde se resuelven las ecuaciones de continuidad y las no estacionarias de Navier-Stokes (URANS) del modelo bifásico VOF (agua-aire).

El modelo utiliza la Función Definida por el Usuario que genera los efectos de las mareas semidiurnas. A través de la elección de parámetros adecuados se realizó la simulación y su validación.

Se han obtenido diferentes resultados para cada sección del puerto: elevación de la superficie del agua, ciclos de las velocidades medias y obtención de la velocidad en función de la profundidad. Con estos datos se procedió al cálculo del potencial y la energía de las corrientes marinas para cada sección.

Los valores de la energía máxima se obtuvieron en la boca del puerto, decreciendo exponencialmente a medida que nos alejamos de la misma.

6. SIMULACIÓN CON MODELO TRIDIMENSIONAL

Mediante la simulación bidimensional se ha realizado una primera aproximación, con el fin de obtener las características del flujo de agua en la Ría de Avilés.

No obstante en una simulación numérica, obtenemos unos resultados más fiables en la medida en que reproduce con mayor precisión la realidad física. En el caso de estudio, el flujo no está caracterizado por una dirección preferente por lo que se hace necesario diseñar un método con una geometría acorde al problema. En este sentido, es evidente que en la simulación bidimensional, no se han analizado los flujos transversales de velocidad, ni su influencia en los resultados. Mediante un modelo en tres dimensiones se pueden analizar las variaciones de la velocidad del agua con la profundidad de la ría.

Con la simulación tridimensional (3D), descrita en este capítulo, se pretende por tanto, acercarse de una manera más fiable al fenómeno del flujo de las mareas en la ría, y por otra parte comparar si el coste computacional del modelo 3D es rentable frente a la simulación 2D, en base a los resultados obtenidos por ambos métodos.

Se aplican las ecuaciones de Navier Stokes en tres dimensiones (3D), mediante la técnica de la Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) con un modelo bifásico aire-agua, para obtener el campo de velocidades generado por las corrientes de marea en diferentes localizaciones, tanto en el dominio global, como en las secciones transversales de la ría.

6.1. Geometría

Con el objeto de reproducir las características de la ría, se han tomado los datos de las márgenes derecha e izquierda de la ría, así como las profundidades, por medio de la Carta Náutica INT 1854 mencionada en el epígrafe 4.2.1, siendo estos valores incorporados al programa Gambit.

Para el cálculo de los perfiles de velocidad y la altura de lámina libre, se ha procedido a dividir la zona entre la boca y el codo de la ría, en secciones transversales cada 50 metros de longitud, en la dirección de la sección media longitudinal de la ría (figura 6.1). Las secciones fueron identificadas por la distancia desde el comienzo de la boca ($x=0$ m, origen de distancias). El modelo geométrico diseñado reproduce el contorno horizontal del suelo del puerto con una altura constante de 16,2 metros, espacio suficiente para simular el flujo bifásico (agua, aire). Las irregularidades de los contornos que no tienen especial repercusión en los resultados y que, por otra parte, implican un incremento importante en el tiempo de cálculo no han sido consideradas, tal como refleja la figura 6.2.



Fig. 6.1 Puerto de Avilés - Localización de las secciones

La geometría final tiene en cuenta dos volúmenes que representan las condiciones iniciales del agua y del aire, contemplando suficiente espacio en la fase aire para el crecimiento de la marea.

Se ha diseñado un prisma rectangular que simula la entrada de agua del mar hacia la bocana de la ría. En su base se aplicará la condición de contorno UDF,

“Función Definida por el Usuario”. El prisma se ha situado a una distancia considerable del comienzo de la boca, con el fin de evitar turbulencias o recirculaciones en la simulación de la marea entrante ajenas al fenómeno físico.

La parte superior de modelo está abierta de manera que el flujo de aire fluya libremente. En la figura 6.2 se puede observar el plano de planta del contorno de la ría y en azul la zona de entrada de agua.

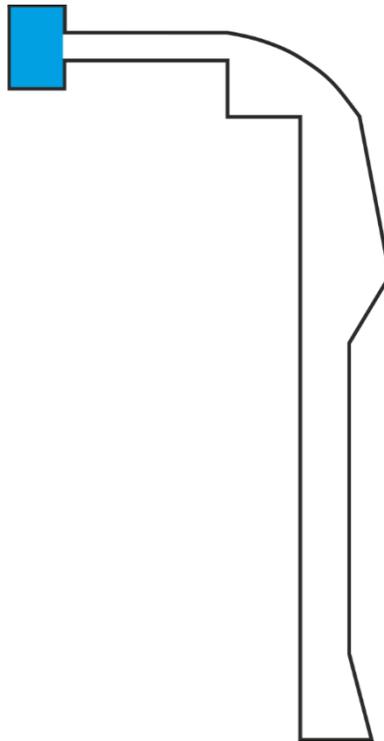


Fig. 6.2 Modelo Geométrico

6.2. Mallado del dominio

En el modelo geométrico se llevó a cabo el mallado estructurado en las áreas de geometría simple, y mallado no estructurado en las geometrías más complejas. Esta solución conduce a un compromiso entre el tiempo de cálculo y la precisión de los resultados. El mallado estructurado está compuesto de prismas cuadrangulares de 10 m de lado y 1 m de altura, y prismas triangulares de 10 m de lado y 1 m de altura (figura 6.3).

La malla resultante está compuesta de 321.648 celdas. Se ha realizado un análisis de sensibilidad de la calidad del refinado del mallado, sin mostrar cambios sustanciales en los resultados obtenidos.

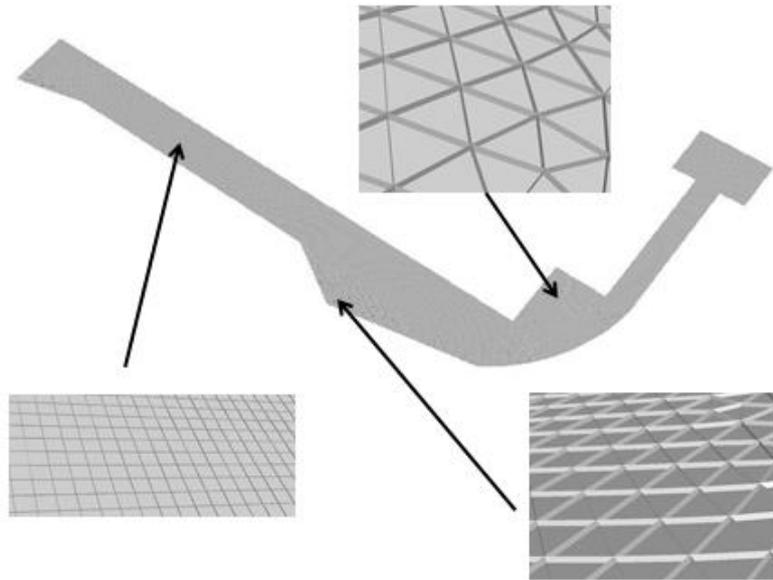


Fig. 6.3 Detalle del mallado

El análisis cualitativo del mallado proporciona resultados satisfactorios, indicando una magnitud de calidad de la malla (equitize skew) de 0,1 para el 92% de las celdas. Este parámetro indica la calidad de las celdas creadas. Valores cerca de 0 indican celdas más regulares, que tienen una alta probabilidad de obtener resultados satisfactorios.

La figura 6.4 muestra el resultado de la calidad (utilizando el factor de sesgo) de un fragmento de mallado.

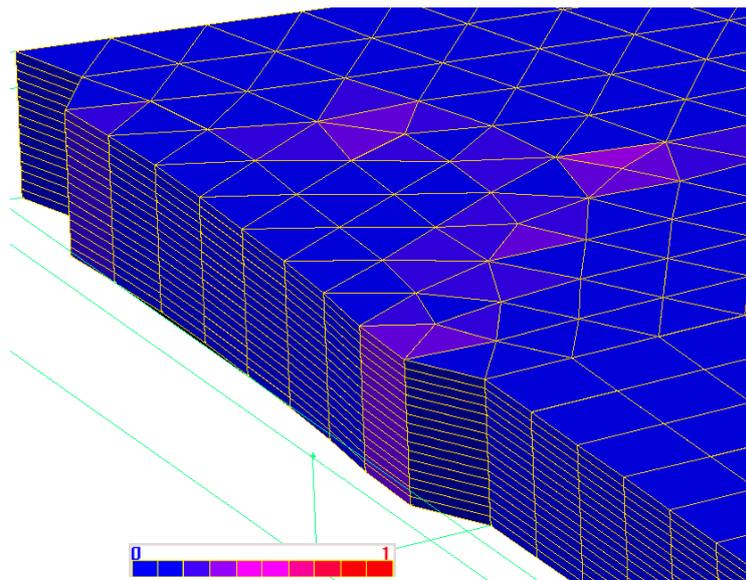


Fig. 6.4 Factor de sesgo, (Equitize skew), de una zona de mallado

6.3. Parámetros temporales y de resolución

Al igual que en el dominio bidimensional se consideran valores constantes para la densidad y la viscosidad de los dos fluidos, aire y agua.

En la simulación se ha fijado un paso temporal de 5 s, que junto al período de la marea nos permite hallar el número de pasos temporales. Por otra parte definimos el número de iteraciones por cada paso.

Se utilizó el método implícito (iterativo) para la discretización temporal de las ecuaciones de gobierno del flujo con el objeto de mejorar la estabilidad respetando el tamaño de paso temporal.

En la ecuación de la derivada respecto al tiempo de la ecuación de continuidad se llevó a cabo la discretización utilizando un esquema de primer orden mientras que en la ecuación de cantidad de movimiento se utilizó un esquema de segundo orden.

Tomando estos parámetros temporales se ha realizado la simulación invirtiendo 7 días en cada ciclo, llevada a cabo mediante un ordenador con procesador i7 con siete núcleos trabajando en paralelo. El gasto computacional tan elevado es debido, como se ha reflejado en 2D, al tiempo intrínseco debido al ciclo de marea, período, y a la resolución de las ecuaciones que es necesario calcular en cada iteración: ecuación de continuidad (dos), ecuaciones del modelo VOF (tres ecuaciones) y dos ecuaciones del modelo k- ϵ de turbulencia.

Para cada fase, las fracciones de volumen se actualizan para cada paso temporal en las celdas computacionales. Con esta información la posición de la interfase se reconstruye utilizando una superficie plana (esquema lineal a trozos). Se toma en consideración que la interfase tiene una pendiente lineal dentro de la celda [152], que ha sido probada para mejorar la reproducción de la superficie entre fases con respecto a otros algoritmos de reconstrucción (figura 6.5).

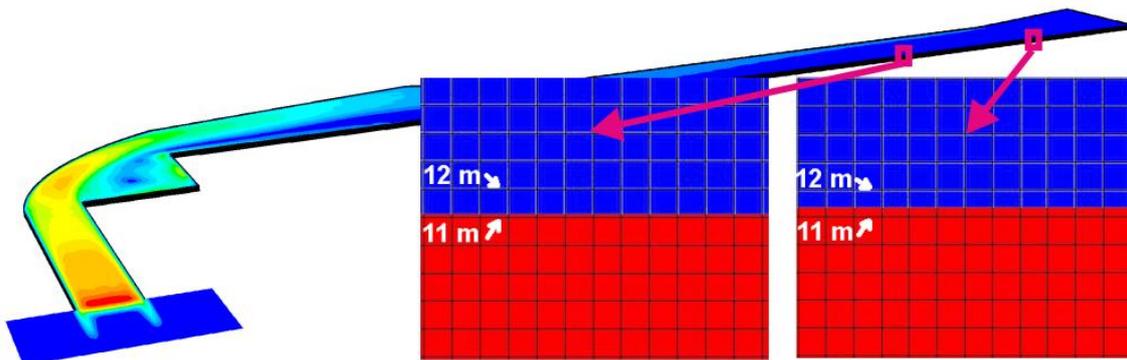


Fig. 6.5 Detalle de la interfase

6.4. Metodología de la simulación

Tal como se ha desrito en el epígrafe 5.6, para la simulación bidimensional, se ha probado el modelo numérico durante el período de 44.700 s correspondientes a un ciclo de marea. Se han adoptado las mismas condiciones de nivel del mar y amplitud de la marea descritas en las tablas 4.1 y 4.2 del Capítulo 4.

El modelo fue validado comparando los resultados obtenidos en la simulación con los máximos valores de velocidad, promediados en profundidad, que vienen reflejados en el “Proyecto de gestión ambiental de los materiales de dragado del Puerto de Avilés” [150] para los puntos P1, P2, P3 : 0,25, 0,12 y 0,10 m/s respectivamente (figura 6.6).

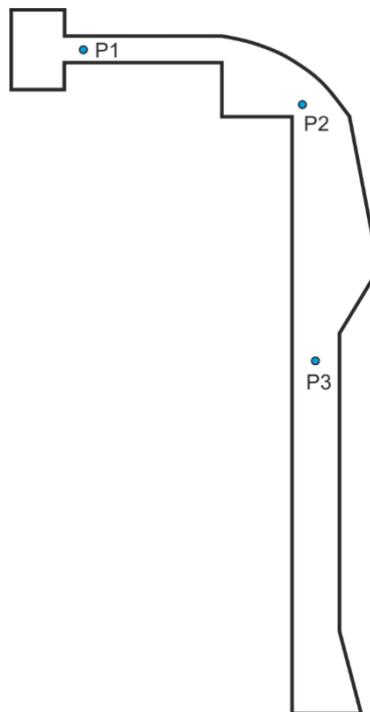


Fig. 6.6 Emplazamiento de los puntos de medida

6.5. Resultados y discusión

6.5.1. *Altura de lámina libre, velocidades máximas y validación del modelo*

Los valores de velocidad máxima fueron obtenidos en la simulación de la marea viva. Las figuras 6.7 y 6.8 muestran los contornos y los vectores de los valores máximos de la velocidad en la superficie libre obtenidos durante el flujo y refluo de la marea de sicígias. En ambos casos, los valores más altos de la velocidad en la superficie libre, alrededor de 0,35-0,40 m/s, aparecen entre la boca y la mitad del codo del puerto. Después la velocidad decrece con la distancia desde la mitad del codo hasta los 0 m/s al final de la ría.

Durante el flujo de la marea, en el codo del canal se produce una separación del flujo desde la cara interior hacia la exterior del mismo. Por eso las velocidades más altas aparecen en esta zona. Este efecto se mantiene desde la entrada del codo (sección $x=800$ m) hasta su parte central, decreciendo los valores de la velocidad a medida que aumenta la distancia a la boca del canal. Como consecuencia de este desplazamiento aparecen remolinos (turbulencias) en la "Dársena de San Juan".

Efectos similares (separación del flujo y remolinos) aparecen durante el reflujo de marea. Sin embargo, en este caso, el flujo se separa hacia la cara exterior del canal, y las mayores velocidades se concentran principalmente en esta zona. Como el caso de flujo de marea, los efectos se mantienen en el mismo área (desde la mitad del codo hasta la sección $x=880$ m) decreciendo los valores de la velocidad a medida que nos distanciamos de la boca del canal.

Teniendo en cuenta estos hechos, es evidente que la energía hidrocínética se concentra, fundamentalmente, en el área comprendida entre la boca del canal y aguas arriba del codo. En el codo la energía está concentrada en la cara exterior con valores de velocidad bajos en la cara interior y en la dársena.

En lo referente a los puntos P_1 , P_2 , P_3 los valores de velocidad máximos obtenidos, promediados en profundidad, fueron de 0,29, 0,16, y 0,05 m/s respectivamente (marea viva). Estos resultados son bastante similares a los datos de velocidad que revela el estudio realizado por la Autoridad Portuaria de Avilés y por ello pueden ser considerados como una validación de los resultados globales obtenidos con el modelo propuesto.

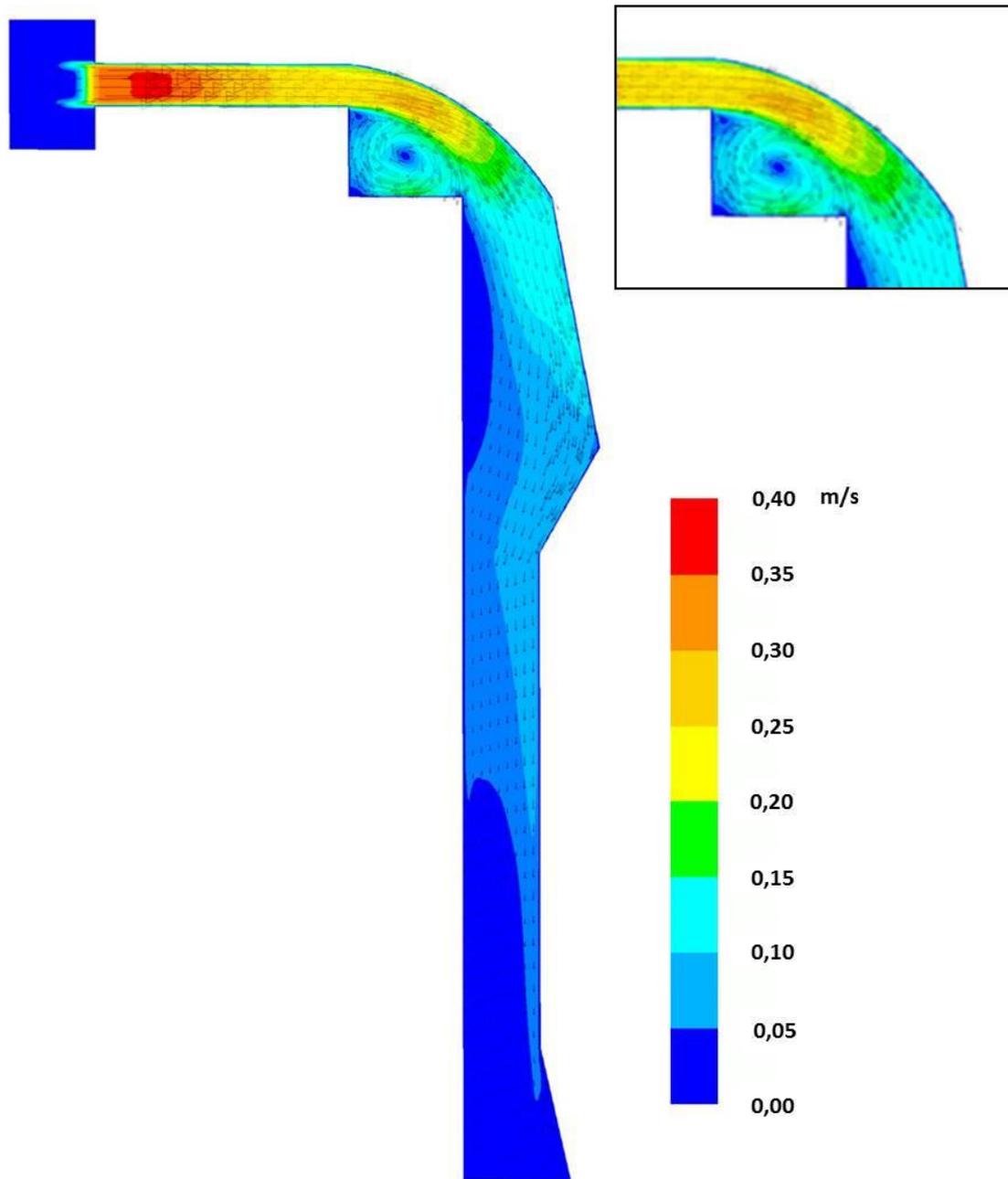


Fig. 6.7 Contornos de máxima velocidad en la superficie libre en el flujo de marea (prueba de marea viva)

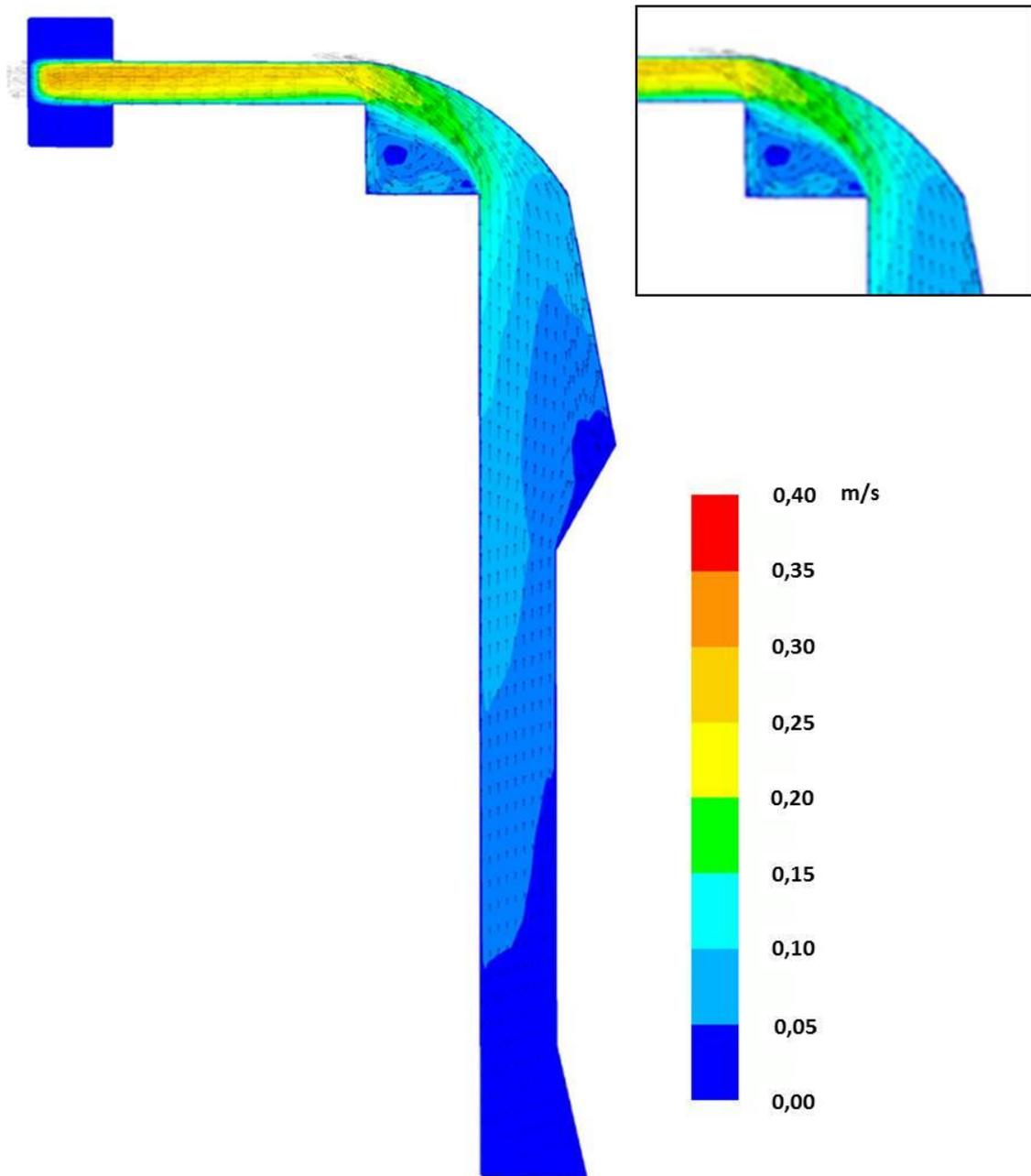


Fig. 6.8 Contornos de máxima velocidad en la superficie libre en el reflujó de marea (prueba de marea viva)

Durante las dos pruebas, la altura de lámina libre obtenida en las diferentes secciones del modelo se corresponden con la presión de entrada aplicada. La figura 6.9 representa un ejemplo de la evolución, durante la prueba de la marea viva, en la sección $x=100$ m.

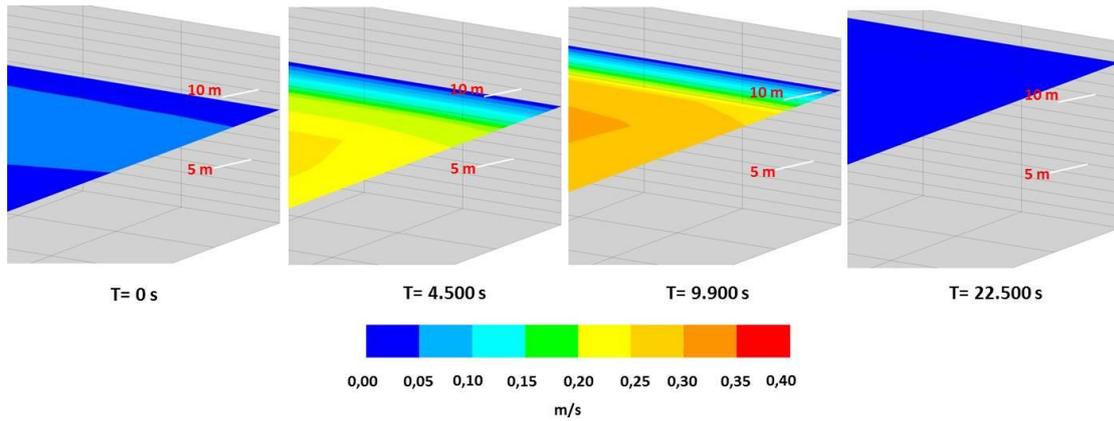


Fig. 6.9 Evolución del nivel del mar durante el refluo de marea ($x=100\text{m}$) (prueba de marea viva)

6.5.2. Ciclos de velocidad

En ambas pruebas (marea viva y marea muerta), la evolución de la velocidad media en cada sección en función del tiempo sigue una onda coseno que se corresponde con la derivada de la condición de contorno aplicada, función sinusoidal. La figura 6.10 muestra un ciclo de los valores absolutos de la velocidad media del agua en la sección $x=50\text{ m}$ en función de la condición de contorno del nivel del mar. El período de cada ciclo de velocidad es aproximadamente de 44.700 s, correspondientes a la variación semidiurna.

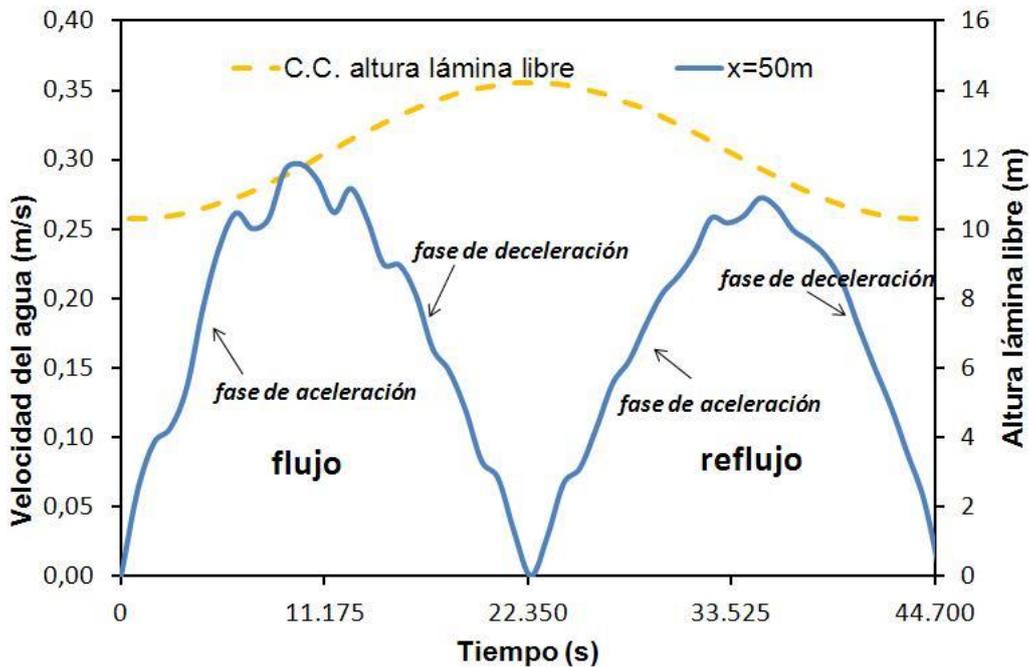


Fig. 6.10 Velocidad media del agua en la sección $x=50\text{ m}$ vs. condición de contorno de altura de lámina libre (prueba de marea viva).

En la figura 6.11 se observan el flujo y refluo de marea, así como sus fases de aceleración y deceleración. El ruido de la señal y la asimetría entre los ciclos positivos y negativos se estima que son debidos a las reflexiones al final del puerto.

La figura 6.12 muestra como los valores de la velocidad media obtenidos decrecen con la distancia de la sección a la boca del puerto. La sección $x=880$ m corresponde al comienzo del codo desde la boca. En esta prueba, las velocidades obtenidas en la vaciante, son bastante similares en las diferentes secciones.

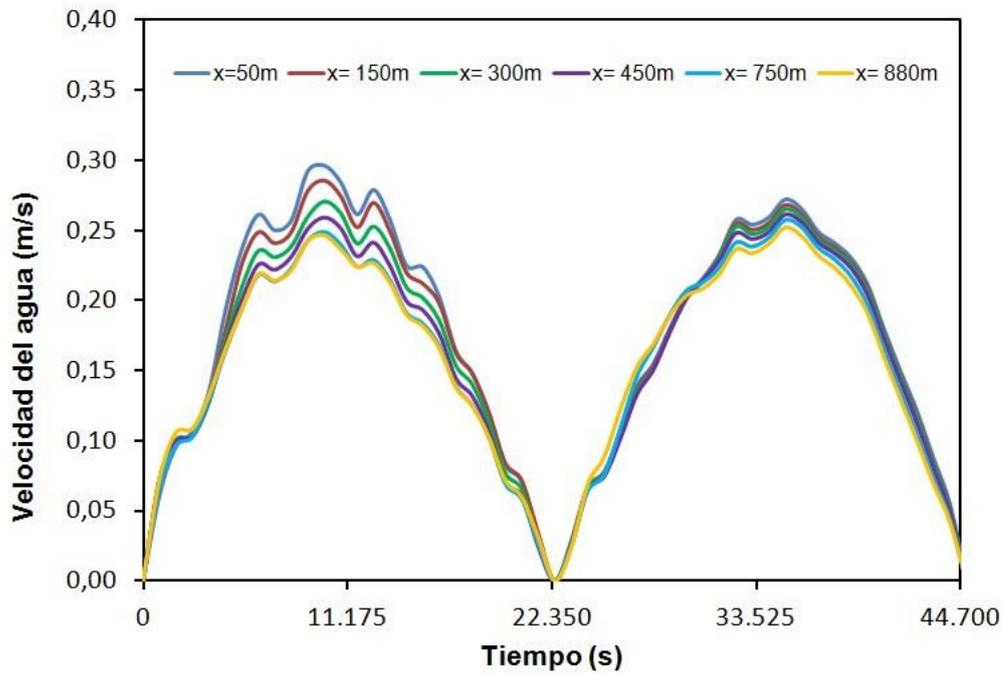


Fig. 6.11 Ciclos de velocidad media del agua en diferentes secciones (prueba de marea viva)

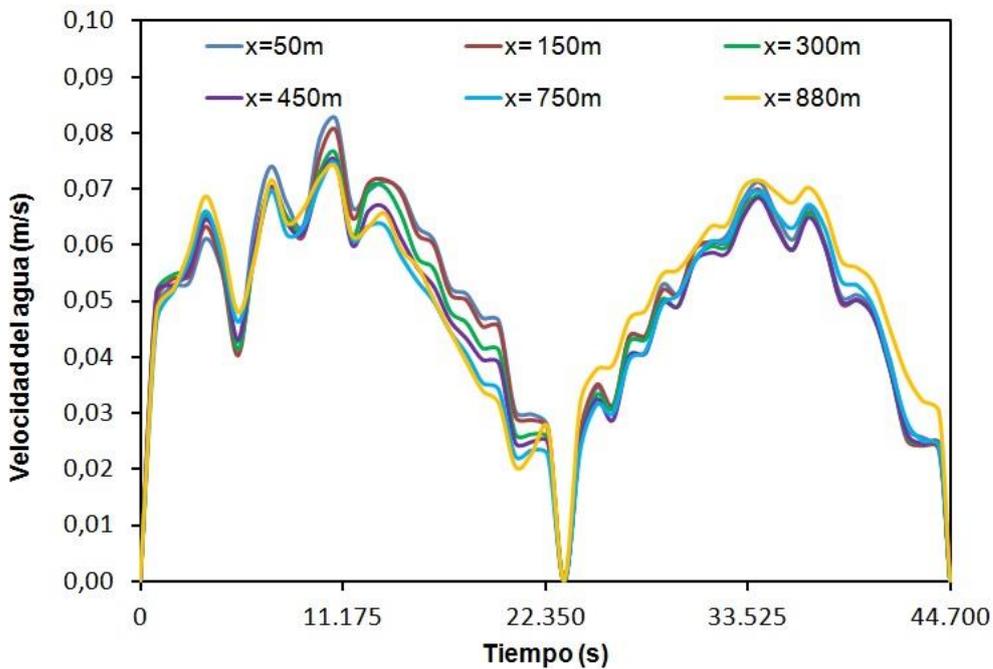


Fig. 6.12 Ciclos de velocidad media del agua en diferentes secciones (prueba de marea muerta)

6.5.3. Perfiles de velocidad

Un ejemplo de los perfiles de velocidad obtenidos es el representado en la figura 6.13, donde se refleja la distribución de la velocidad en la sección $x=100$ m durante la secuencia del flujo de la marea viva en sus dos fases: fase de aceleración (4.500 s - 9.900 s) y deceleración (9.900 s - 15.300 s). La figura 6.14 refleja el perfil de velocidades en la misma sección durante la fase de refluo de la marea viva: fase de aceleración (28.800 s - 35.100 s) y fase de deceleración (35.100 s - 39.600 s). En ambos casos, el perfil de velocidades muestra una distribución no uniforme de la velocidad en función de la profundidad, y la existencia de mayores velocidades en la cara exterior durante el refluo de marea, debido a la separación del flujo en el codo.

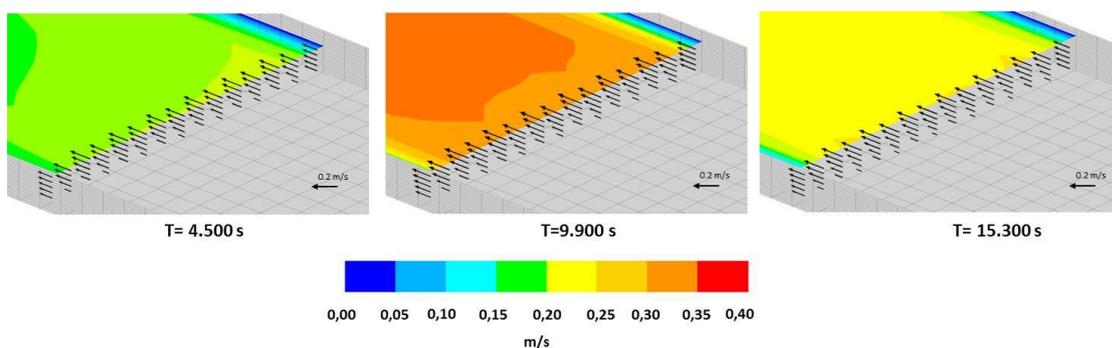


Fig. 6.13 Secuencias de los perfiles de velocidad en el flujo de marea, sección $x=100$ (prueba de marea viva)

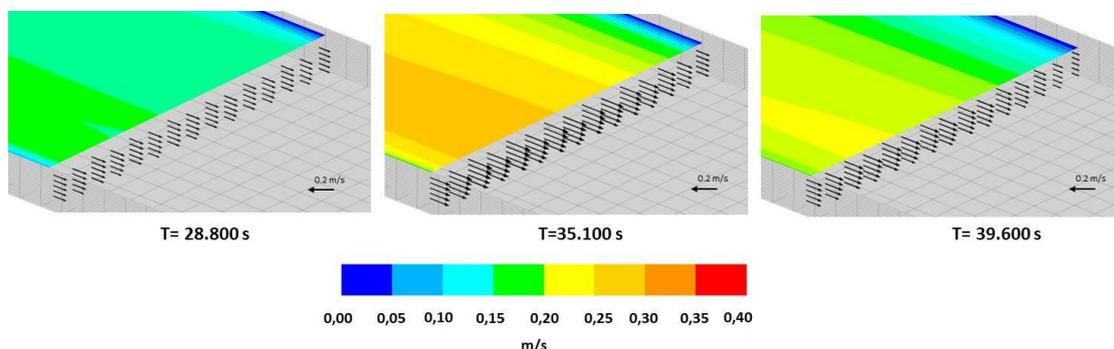


Fig. 6.14 Secuencias de los perfiles de velocidad en el refluo de marea, sección $x=100$ (prueba de marea viva)

La figura 6.15 muestra el perfil de velocidades en la sección $x=880$ m durante la marea viva: fase de aceleración (4.500 s - 9.900 s) y deceleración (9.900 s - 15.300 s). En la figura 6.16 se observa el perfil de velocidades en la sección $x=880$ m durante el refluo de la marea viva: fase de aceleración (28.800 s - 35.100 s) y fase de deceleración (35.100 s - 39.600 s). Como se ha visto en otros casos, los perfiles de velocidad no son uniformes y la rotación de los perfiles se detecta durante el refluo de la marea debido al flujo de separación en el codo.

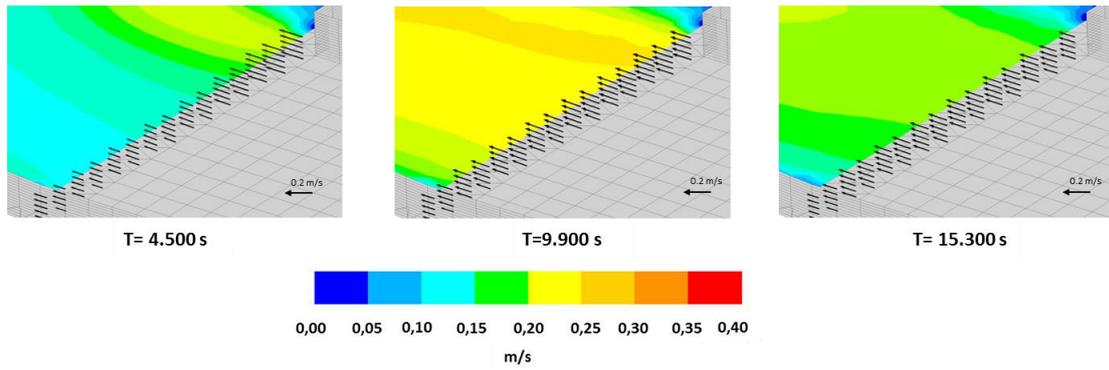


Fig. 6.15 Secuencias de los perfiles de velocidad en el flujo de marea, sección x=880 (prueba de marea viva)

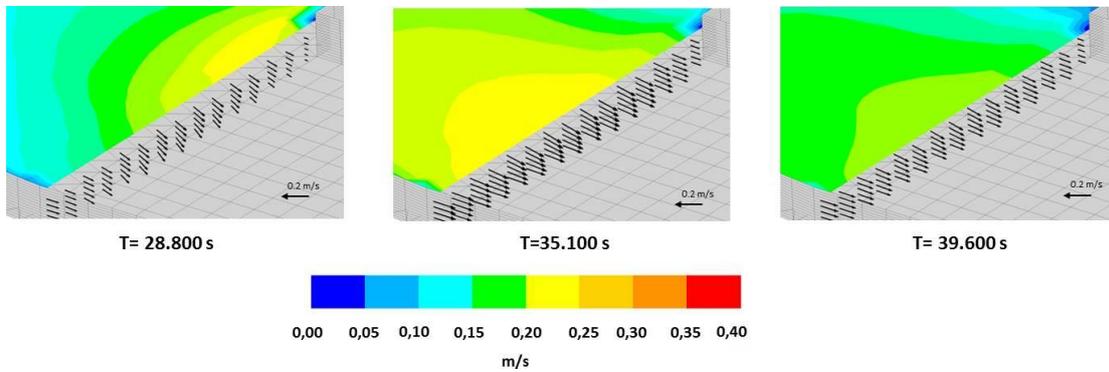


Fig. 6.16 Secuencias de los perfiles de velocidad en el reflujo de marea, x=880 (prueba de marea viva)

6.5.4. **Potencia y energía de las corrientes de marea**

Como se ha mencionado en el Capítulo 4, epígrafe 5.5.4, se obtiene la potencia disponible, por m², como producto de la densidad y de la velocidad al cubo de la corriente.

Los valores de la potencia de las corrientes de marea en cada sección, se corresponden con los lugares donde las velocidades máximas fueron detectadas (desde x=100 m hasta x=880 m). Dichos valores se obtienen utilizando los datos de la velocidad para las mareas vivas y muertas. La figura 6.17, refleja los valores obtenidos, en la prueba de marea viva, en las diferentes secciones.

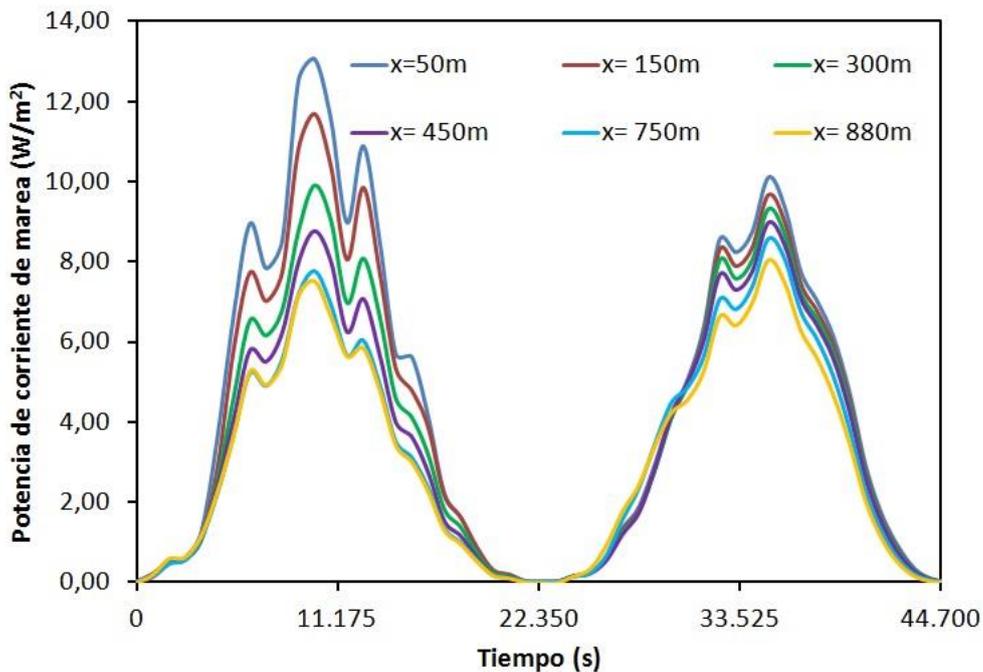
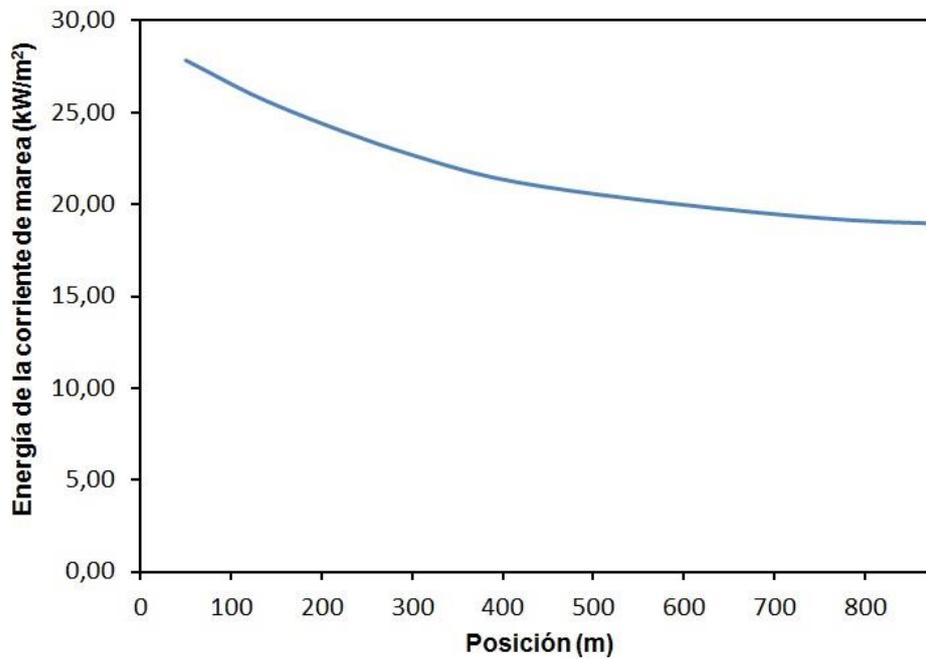


Fig. 6.17 Potencia de las corrientes de marea en diferentes secciones (prueba en la marea viva)

Los valores de la energía de corriente de marea, en las diferentes secciones transversales obtenidas con el modelo, pueden observarse en la figura 6.18. El valor máximo, 28 kWh/m², se obtiene en la boca de la ría con una disminución exponencial al aumentar la distancia a la misma hasta x=300 m, a partir de la cual sufre una ligera disminución de energía hasta la distancia x=880 m.



6.18 Energía de las corrientes de marea en diferentes secciones

Fig.

6.6. Conclusiones

En esta investigación se ha presentado una metodología basada en la resolución de las ecuaciones de Navier-Stokes utilizando las técnicas de CFD en 3D para un modelo bifásico (aire-agua), con el objetivo de evaluar las corrientes y el potencial energético derivado de los movimientos de marea. El modelo bifásico está basado en el esquema VOF teniendo en cuenta los efectos de la profundidad del canal así como la necesidad de seleccionar el emplazamiento óptimo para futuros conjuntos de instalaciones de microturbinas.

La metodología fue aplicada a la Ría de Avilés. El mallado del modelo fue realizado utilizando celdas con prismas cuadrangulares y triangulares, en las que se resolvieron las ecuaciones de continuidad y la ecuaciones no estacionarias de Navier-Stokes (URANS). Se ha utilizado una UDF para definir los efectos de las mareas semidiurnas. Con la selección de los adecuados parámetros de simulación se realizó la validación del modelo con datos reales. Se han obtenido diferentes resultados: elevación de la superficie del agua, velocidades medias por cada ciclo y velocidades en función de la profundidad. El área comprendida desde la bocana hasta la mitad del codo de la ría, se ha revelado como la zona de máxima velocidad, y el valor máximo de energía de la corriente marina se obtiene en la bocana decreciendo exponencialmente a medida que nos alejamos de la misma.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Petroleum, British. "BP statistical review of world energy." (2016).
- [2] International Energy Agency. Key world energy statistics. International Energy Agency, 2016.
- [3] Europea, Unión. "Directiva 2012/27/UE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 25 de octubre de 2012, relativa a la eficiencia energética, por la que se modifican las Directivas 2009/125/CE y 2010/30/UE, y por la que se derogan las Directivas 2004/8/CE y 2006/32/CE Texto pertinente a efectos del EEE." Diario Oficial de la Unión Europea 315 (2012): 1-56.
- [4] www.ocean-energy-systems.org
- [5] Soerensen, Hans Chr, and Alla Weinstein. "Ocean energy: position paper for IPCC." Key Note Paper for the IPCC Scoping Conference on Renewable Energy, Lübeck, Germany, January. 2008.
- [6] Sandén, B. A. (2014). Systems Perspectives on Renewable Power 2014.
- [7] Johansson, T. B. (1993). Renewable energy: sources for fuels and electricity. Island press.
- [8] Hooper, T., & Austen, M. (2013). Tidal barrages in the UK: Ecological and social impacts, potential mitigation, and tools to support barrage planning. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 23, 289-298.
- [9] State of the Science. Environmental Effects of Marine Renewable Energy Development Around the World. Annex IV. Pacific Northwest National Laboratory. 2016.
- [10] Foley, Todd, et al. "REN21-Renewables 2015 Global Status Report." REN, Paris (2015): 251.
- [11] Mofor, L., J. Goldsmith, and F. Jones. "Ocean energy: Technology readiness, patents, deployment status and outlook." Abu Dhabi (2014).
- [12] Uihlein, Andreas, and Davide Magagna. "Wave and tidal current energy—a review of the current state of research beyond technology." Renewable and Sustainable Energy Reviews 58 (2016): 1070-1081.
- [13] Magagna, Davide, and Andreas Uihlein. "Ocean energy development in Europe: Current status and future perspectives." International Journal of Marine Energy 11 (2015): 84-104.
- [14] Rourke, F. O., Boyle, F., & Reynolds, A. (2010). Tidal energy update 2009. Applied Energy, 87(2), 398-409.

- [15] Bae, Young Ho, Kyeong Ok Kim, and Byung Ho Choi. "Lake Sihwa tidal power plant project." *Ocean Engineering* 37.5 (2010): 454-463.
- [16] Canada NR. *Technology Evaluation of Existing and Emerging Technologies* 2006;3502:1–48.
- [17] The European Marine Energy Centre (EMEC). <http://www.emec.org.uk>
- [18] Devine-Wright, P. (2011). Place attachment and public acceptance of renewable energy: A tidal energy case study. *Journal of Environmental Psychology*, 31(4), 336-343.
- [19] Vennell, R., Funke, S. W., Draper, S., Stevens, C., & Divett, T. (2015). Designing large arrays of tidal turbines: A synthesis and review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 41, 454-472.
- [20] Legrand, Claire. *Assessment of tidal energy resource: Marine renewable energy guides*. European Marine Energy Centre, 2009.
- [21] Alvarez, E. A., Francos, J. F., Manso, A. N., Secades, M. R., & Gutiérrez-Trashorras, A. J. (2013, December). Obtaining renewable energy from tidal currents in the Aviles port: New services for citizens. In *New Concepts in Smart Cities: Fostering Public and Private Alliances (SmartMILE)*, 2013 International Conference on (pp. 1-9). IEEE.
- [22] Ocean Renewable Power Company. <http://www.orpc.co/content.aspx?p=h3jCHHn6gcg%3D>
- [23] Previsic, M., et al. "Survey and Characterization Tidal In Stream Energy Conversion (TISEC) Devices." (2005).
- [24] Ocean Renewable Energy Coalition (OREC), Verdant Power, Marine and Hydrokinetic Technology Background and Perspective for New York State, Final Report., New York, 2012.
- [25] Lewis M, Neill SP, Robins PE, Hashemi MR. Resource assessment for future generations of tidal-stream energy arrays. *Energy* 2015;83:403–15. doi:10.1016/j.energy.2015.02.038.
- [26] Legrand, Claire. *Assessment of tidal energy resource: Marine renewable energy guides*. European Marine Energy Centre, 2009.
- [27] Culley DM, Funke SW, Kramer SC, Piggott MD. Integration of cost modelling within the micro-siting design optimisation of tidal turbine arrays. *Renew Energy* 2016;85:215–27. doi:10.1016/j.renene.2015.06.013.
- [28] Evans, P., Mason-Jones, A., Wilson, C., Wooldridge, C., O'Doherty, T., & O'Doherty, D. (2015). Constraints on extractable power from energetic tidal straits. *Renewable Energy*, 81, 707-722.

- [29] www.nasa.gov
- [30] Mederos Martín, L. "Las mareas-Atracción Gravitatoria entre el Sol y la Luna." Barcelona: Rodamedia (2009): 38-41.
- [31] González, Manuel, et al. "19 (4) Propuesta de clasificación del potencial de las corrientes, mareas y oleaje para su posible aprovechamiento energético." (2012).
- [32] www.ukho.gov.uk
- [33] www.puertoaviles.es
- [34] de Aldecoa Quintana, Juan Miguel Ibáñez. "Niveles de madurez tecnológica: Technology readiness levels: TRLS: una introducción." *Economía industrial* 393 (2014): 165-171.
- [35] Mankins, John C. "Technology readiness levels." White Paper, April 6 (1995).
- [36] Shi, John Z., and Hong-Long Zhang. "Note on a 2DH finite element model of tidal flow of the North Passage of the partially-mixed Changjiang River estuary, China." *Journal of Hydro-environment Research* 5.1 (2011): 49-62.
- [37] Taylor, G. I. (1921). Tides in the Bristol channel. In *Proceedings of the Cambridge Philosophical Society* (Vol. 20, pp. 320-325).
- [38] Proudman, J. (1925). XLIX. Tides in a channel. *Philosophical Magazine Series* 6, 49(290), 465-475.
- [39] Grace, S. F. "The Influence of Friction on the Tidal Motion of the Gulf of Suez." *Geophysical Journal International* 2.s7 (1931): 309-318.
- [40] Doodson, Arthur T., and Robert Henry Corkan. "The principal constituent of the tides in the English and Irish Channels." *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical or Physical Character* 231 (1933): 29-53.
- [41] Otter, J.R.H., Day, A.S., 1960. Tidal flow computations. *The Engineer* 209,177e182.
- [42] Johns, B., 1960. On the vertical structure of tidal flow in river estuaries. *Geophysical Journal of Royal Astronomical Society* 12, 103e110.
- [43] Rossiter, J.R., Lennon, G.W., 1965. Computation of tidal conditions in the Thames Estuary by the initial-value method. *Proceedings of Institution of Civil Engineers* 31, 25e56.
- [44] Banks, J.E., 1974. A mathematical model of a river-shallow sea system used to investigate tide, surge and their interaction in the Thames-Southern North Sea region. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London* A275 (1255), 567e609.
- [45] Blumberg, A.F., 1977. Numerical tidal model of Chesapeake Bay. *Journal of the Hydraulics Division* 103 (HY1), 1e10.
- [46] Henry, F.S., Ahlert, R.C., Peskin, R.L., Vichnevetsky, R., 1984. A numerical estuarine flow model. *Journal of the American Water Resources Association* 20 (6), 823e831.

- [47] Muchow, A., Garvine, R.W., 1991. Nonlinear barotropic tides and bores in estuaries. *Tellus* 43A, 246e256.
- [48] Liang, D., Falconer, R.A., Lin, B., 2006. Improved numerical modelling of estuarine flows. *Proceedings of Institution of Civil Engineers, Maritime Engineering* 159 (MA1), 25e35.
- [49] Chen, Changsheng, Hedong Liu, and Robert C. Beardsley. "An unstructured grid, finite-volume, three-dimensional, primitive equations ocean model: application to coastal ocean and estuaries." *Journal of atmospheric and oceanic technology* 20.1 (2003): 159-186.
- [50] Cea, Luis, M. E. Vázquez-Cendón, and J. Puertas. "Modelización matemática en lecho fijo del flujo en ríos. Modelos 1D y 2D en régimen permanente y variable." Grupo de Ingeniería del Agua y del Medioambiente. España (2009).
- [51] Bladé Castellet, Ernest. "Modelación del flujo en lámina libre sobre cauces naturales. Análisis integrado con esquemas en volúmenes finitos en una y dos dimensiones." (2005).
- [52] DHI, MIKE. "11. A Modelling System for Rivers and Channels. Reference Manual." DHI Water & Environment, Denmark (2011).
- [53] www.hec.usace.army.mil
- [54] Suárez, Daniel Fernández, et al. "Evaluación del potencial energético de las corrientes de marea en la desembocadura del río Nalón (Asturias, España) mediante simulación de flujo unidimensional." *Ingeniería del agua* 19.1 (2015): 31-42.
- [55] Pilpayed Alireza, et al. "Hydrodynamic simulation of surface water control sluice gates by 2014 Tulcea(Romania)
- [56] Timbe Castro, Luis Manuel, and Edison Patricio Timbe Castro. "Mapeo del peligro de inundación en ríos de montaña, caso de estudio del río Burgay." (2012).
- [57] Kardavani, Parviz, and Mohammad Hossein Qalehe. "Efficiency of Hydraulic Models for Flood Zoning Using GIS (Case Study: Ay-Doghmarsh River Basin)." *Life Science Journal* 10.2 (2013).
- [58] ShahiriParsa, Ahmad, et al. "Floodplain Zoning Simulation by Using HEC-RAS and CCHE2D Models in the Sungai Maka River." *Air, Soil and Water Research* 9 (2016): 55.
- [59] Ahmad Hosseini et al. *Simulating of Unsteady Flow in Tidal Zones.*
- [60] www.mikepoweredbydhi.com.
- [61] Monninkhoff, B. "IFMMIKE11 1.1 Coupling the groundwater model FEFLOW and the surface water model MIKE11-User Manual." Berlin, WASY Software (2005).
- [62] Dehkordi, Davoud Khodadadi, and Heidar Ali Kashkuli. "Water quality improvement of Hendijan River by use of Mike 11 model." *Advances in Environmental Biology* (2015): 319-328.
- [63] Sandu, Mirela-Alina, and Ana Virsta. "Applicability of MIKE SHE to Simulate Hydrology in Argesel River Catchment." *Agriculture and Agricultural Science Procedia* 6 (2015): 517-524.

- [64] Razdar, B., et al. "Determining the best water quality model for the rivers in north of Iran (case study: Pasikhan River)." *Computational Methods in Civil Engineering* 2.1 (2011): 105-116.
- [65] Alaghmand, Sina, et al. "Comparison between capabilities of HEC-RAS and MIKE11 hydraulic models in river flood risk modelling (a case study of Sungai Kayu Ara River basin, Malaysia)." *International Journal of Hydrology Science and Technology* 2.3 (2012): 270-291.
- [66] Villazón, Mauricio F., Luis M. Timbe, and Patrick Willems. "Comparative analysis of 1-D river flow models applied in a quasi 2-D approach for floodplain inundation prediction." *Maskana* 4.1 (2015): 107-126.
- [67] Brandt, S. Anders, and Nancy Joy Lim. "Importance of river bank and floodplain slopes on the accuracy of flood inundation mapping." *International Conference on Fluvial Hydraulics. River Flow 2012. San José, Costa Rica, 5-7 September 2012.* CRC Press/Balkema (Taylor & Francis), 2012.
- [68] Horritt, M. S., and P. D. Bates. "Evaluation of 1D and 2D numerical models for predicting river flood inundation." *Journal of hydrology* 268.1 (2002): 87-99.
- [69] Cook, Aaron, and Venkatesh Merwade. "Effect of topographic data, geometric configuration and modeling approach on flood inundation mapping." *Journal of Hydrology* 377.1 (2009): 131-142.
- [70] Panda, Rabindra K., Niranjana Pramanik, and Biplab Bala. "Simulation of river stage using artificial neural network and MIKE 11 hydrodynamic model." *Computers & Geosciences* 36.6 (2010): 735-745.
- [71] Awol, Frezer Seid, Tobias Drueckler, and Silvia Matz. "Hydropower Energy Simulation Using Mike 11 Model; A Case Study In South Germany's Small Run-Of-River Hydropower Plants." (2014).
- [72] Muku, Lawrence Omai, and Gilbert Nyandwaro. "River Flood Modelling with Mike 11: Case of Nzoia River (Budalangi) in Kenya."
- [73] Torp Larsen et al. "Flood forecasting system base on the distributed hydrological model MIKE SHE-MKE11".
- [74] Chen C., R.C. Beardsley et al. "An unstructured-grid, finite-volume community ocean model FVCOM user manual" (3rd edition).
- [75] Chero, Lluén, Willy Eduardo, and Ernest Bladé i Castellet. "Aplicación de la nueva herramienta HEC-RAS 5.0 para cálculos bidimensionales del flujo de agua en ríos." *Actas de las IV Jornadas de Ingeniería del Agua: la precipitación y los procesos erosivos.* Universidad de Córdoba, 2015.
- [76] HEC-RAS, River analysis systems. User's Manual. Versión 5.0.
- [77] Brunner, Gary W. "HEC-RAS (River Analysis System)." *North American Water and Environment Congress & Destructive Water:.* ASCE, 2010.
- [78] Lluén Chuewro W. "Aplicacion de la nueva herramienta HEC-RAS 5.0 para flujo en ríos". 2015.
- [79] Quiroga, V. Moya, et al. "Application of 2D numerical simulation for the analysis of the February 2014 Bolivian Amazonia flood: Application of the new HEC-RAS version 5." *RIBAGUA-Revista Iberoamericana del Agua* 3.1 (2016): 25-33.

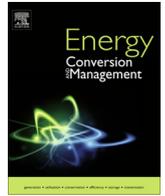
- [80] Mohammadi, S. A., M. Nazariha, and N. Mehrdadi. "Flood damage estimate (quantity), using HEC-FDA model. Case study: the Neka river." *Procedia Engineering* 70 (2014): 1173-1182.
- [81] Drake, Jennifer, Andrea Bradford, and Doug Joy. "Application of HEC-RAS 4.0 temperature model to estimate groundwater contributions to Swan Creek, Ontario, Canada." *Journal of Hydrology* 389.3 (2010): 390-398.
- [82] Halwatura, D., and M. M. M. Najim. "Application of the HEC-HMS model for runoff simulation in a tropical catchment." *Environmental Modelling & Software* 46 (2013): 155-162.
- [83] www.iberaula.es
- [84] Bladé, E., et al. "Iber: herramienta de simulación numérica del flujo en ríos." *Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería* 30.1 (2014): 1-10.
- [85] Modelización bidimensional del flujo en lámina libre en aguas poco profundas. Manual de referencia hidráulico. Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino. 2014.
- [86] Bladé i Castellet, Ernest, et al. "Estimación del hidrograma de salida en una cuenca usando un modelo hidrológico distribuido y un modelo hidráulico bidimensional en volúmenes finitos." (2014).
- [87] Mapas de peligrosidad y riesgo de inundación de las ARPSis fluviales. (Demarcación hidrográfica de Gran Canaria). Consejo Insular de Aguas de Gran Canaria.
- [88] Vuik, V. Numerical modeling of sediment transport over hydraulic structures. Diss. TU Delft, Delft University of Technology, 2010.
- [89] MIKE21 Flow Model FM. Hydrodynamic Module. User Guide.
- [90] O'Rourke, Fergal, Fergal Boyle, and Anthony Reynolds. "Ireland's tidal energy resource; An assessment of a site in the Bulls Mouth and the Shannon Estuary using measured data." *Energy Conversion and Management* 87 (2014): 726-734.
- [91] Kulkarni, Rohit Rajesh. "Numerical Modelling of Coastal Erosion using MIKE21." (2013).
- [92] Guy Fu, Weixing Jiang. "Scenario Studies on the Salinity Intrusions. In the Yangtze Estuary".
- [93] www.tudelft.nl
- [94] Bornia, G., et al. "On the properties and limitations of the height function method in two-dimensional Cartesian geometry." *Journal of Computational Physics* 230.4 (2011): 851-862.
- [95] "3D/2D modelling suite for integral water solutions". Deltares User Manual. 2014.
- [96] Iglesias, G., R. Carballo, and A. Castro. "Baroclinic modelling and analysis of tide- and wind-induced circulation in the Ría de Muros (NW Spain)." *Journal of Marine Systems* 74.1 (2008): 475-484.

- [97] Carballo, R., G. Iglesias, and A. Castro. "Numerical model evaluation of tidal stream energy resources in the Ría de Muros (NW Spain)." *Renewable Energy* 34.6 (2009): 1517-1524.
- [98] Pacheco, A., et al. "Evaluation of the production of tidal stream energy in an inlet channel by coupling field data and numerical modelling." *Energy* 71 (2014): 104-117.
- [99] Ramos, V., and G. Iglesias. "Performance assessment of tidal stream turbines: a parametric approach." *Energy Conversion and Management* 69 (2013): 49-57.
- [100] Gyssels, Paolo, et al. "Mecánica Computacional, Volume XXXII. Number 33. Numerical Simulation, Modeling and Environmental Analysis."
- [101] Chen, C. (2012). *An Unstructured-grid, Finite-volume Community Ocean Model: FVCOM User Manual*. Sea Grant College Program, Massachusetts Institute of Technology.
- [102] Ramos, V., Carballo, R., Sanchez, M., Veigas, M., & Iglesias, G. (2014). Tidal stream energy impacts on estuarine circulation. *Energy Conversion and Management*, 80, 137-149.
- [103] Platzek, F. W., Stelling, G. S., Jankowski, J. A., & Pietrzak, J. D. (2014). Accurate vertical profiles of turbulent flow in z-layer models. *Water resources research*, 50(3), 2191-2211.
- [104] Trouw, K. J. M., Zimmermann, N., Mathys, M., Delgado, R., & Roelvink, D. (2012). Numerical modelling of hydrodynamics and sediment transport in the surf zone: a sensitivity study with different types of numerical models. *Coastal Engineering Proceedings*, 1(33), 23.
- [105] Sánchez, M., Carballo, R., Ramos, V., & Iglesias, G. (2014). Energy production from tidal currents in an estuary: A comparative study of floating and bottom-fixed turbines. *Energy*, 77, 802-811.
- [106] www.myroms.org
- [107] Haidvogel, Dale B., et al. "Ocean forecasting in terrain-following coordinates: Formulation and skill assessment of the Regional Ocean Modeling System." *Journal of Computational Physics* 227.7 (2008): 3595-3624.
- [108] Wang, Xiaochun, et al. "Tidal simulation using regional ocean modeling systems (ROMS)." (2006): 13-18.
- [109] Shchepetkin, Alexander F., and James C. McWilliams. "The regional oceanic modeling system (ROMS): a split-explicit, free-surface, topography-following-coordinate oceanic model." *Ocean Modelling* 9.4 (2005): 347-404.
- [110] mitgcm.org
- [111] Adcroft, A., et al. "MITgcm user manual." (2016).
- [112] Sánchez Garrido, José Carlos, et al. "Numerical modeling of three-dimensional stratified tidal flow over Camarinal Sill, Strait of Gibraltar." *Journal of Geophysical Research: Oceans* 116.C12 (2011).
- [113] Sammartino, S., et al. "A numerical model analysis of the tidal flows in the Bay of Algeciras, Strait of Gibraltar." *Continental Shelf Research* 72 (2014): 34-46.
- [114] Nash, Jonathan D., et al. "The unpredictable nature of internal tides on continental shelves." *Journal of Physical Oceanography* 42.11 (2012): 1981-2000.

- [115] Vlasenko, Vasilii, et al. "Tidal energy conversion in a global hot spot: On the 3- D dynamics of baroclinic tides at the Celtic Sea shelf break." *Journal of Geophysical Research: Oceans* 119.6 (2014): 3249-3265.
- [116] DHI, MIKE. "& MIKE 3 flow model FM." *Hydrodynamic and Transport Module Scientific Documentation, Release* (2007).
- [117] www.cpc.ncep.noaa.gov
- [118] Moharir, Rucha V., Krishna Khairnar, and Waman N. Paunikar. "MIKE 3 as a modeling tool for flow characterization: A review of applications on water bodies." *International Journal of Advanced Studies in Computers, Science and Engineering* 3.3 (2014): 32.
- [119] Jang, Dong Woo, HyoSeon Park, and JinTak Choi. "A Study on the Water Gate Operation in the Canal System by MIKE 3 FM." *International Journal of Control and Automation* 8.1 (2014): 157-168.
- [120] Goyal, Rohit, and Prameet Rathod. "Hydrodynamic modelling for salinity of Singapore Strait and Johor Strait using MIKE 3FM." *International Proceedings of Chemical, Biological and Environmental Engineering* 4 (2011): 295-300.
- [121] <http://fvcom.smast.umassd.edu/>
- [122] Chen, Changsheng, Hedong Liu, and Robert C. Beardsley. "An unstructured grid, finite-volume, three-dimensional, primitive equations ocean model: application to coastal ocean and estuaries." *Journal of atmospheric and oceanic technology* 20.1 (2003): 159-186.
- [123] Tang, H. S., et al. "Potential sites for tidal power generation: A thorough search at coast of New Jersey, USA." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 39 (2014): 412-425.
- [124] Chen, Changsheng, et al. "Tidal dynamics in the Gulf of Maine and New England Shelf: An application of FVCOM." *Journal of Geophysical Research: Oceans* 116.C12 (2011).
- [125] Kochevsky, Alexey N. "Possibilities of Simulation of Fluid Flows Using the Modern CFD Software Tools." *arXiv preprint physics/0409104* (2004).
- [126] www.ansys.com
- [127] www.fluent.com
- [128] www.numeca.com
- [129] www.flower3d.org
- [130] www.flowvision.ru
- [131] Khalid, Syed Shah, Zhang Liang, and Nazia Shah. "Harnessing tidal energy using vertical axis tidal turbine." *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology* 5.1 (2012): 239-252.
- [132] Kochevsky, Alexey N. "Computation of Internal Fluid Flows in Channels Using the Package CFX-5." *arXiv preprint physics/0509192* (2005).

-
- [133] Guo, Bin, Da Zheng Wang, and Jun Wei Zhou. "Numerical predictions and experimental verifications for hydrodynamic performance of tidal stream turbine." *Advanced Materials Research*. Vol. 694. Trans Tech Publications, 2013.
- [134] Lloyd, Thomas P., Stephen R. Turnock, and Victor F. Humphrey. "Unsteady CFD of a marine current turbine using OpenFOAM with generalised grid interface." (2011).
- [135] Fluent, Ansys. "UDF Manual." Ansys Inc (2013).
- [136] Fluent, Ansys. "User's guide." User Inputs for Porous Media 6 (2013).
- [137] Fluent, Ansys. "Theory Guide." Ansys Inc 5 (2013).
- [138] Fernández Oro, Jesús M. "Técnicas numéricas en Ingeniería de Fluidos." Ed. Reverté, Barcelona, España (2012).
- [139] <http://www.lanl.gov>
- [140] Vázquez, Juan Luis. "La ecuación de Navier-Stokes. Un reto físico-matemático para el siglo XXI." *Monografías de la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas, Químicas y Naturales de Zaragoza* 26 (2004): 31-56.
- [141] Vázquez, Juan Luis. "Fundamentos matemáticos de la mecánica de fluidos." Madrid: Departamento de Matemáticas-Universidad (2003).
- [142] Fluent, Ansys. "Gambit 2.4 User's Guide."
- [143] GAMBIT, Ansys. "2.4 Tutorial Guide."
- [144] Fernández. Oro Jesús Manuel Modelización trifásica del proceso de vertido de vidrio fundido en un baño de estado líquido en presencia de atmósfera inerte.
- [145] Andersson, Bengt, et al. *Computational fluid dynamics for engineers*. Cambridge University Press, 2011.
- [146] Vale, L. M., and J. M. Dias. "The effect of tidal regime and river flow on the hydrodynamics and salinity structure of the Lima Estuary: Use of a numerical model to assist on estuary classification." *Journal of Coastal Research* 64 (2011): 1604.
- [147] Peláez, J. López, and G. Flor. "Evolución ambiental del estuario de Avilés (1833-2006)." *Trabajos de geología* 28.28 (2008).
- [148] Reglamento de la OHI para Cartas Internacionales y especificaciones cartográficas de la OHI. Edición 4.5.0. Octubre 2014.
- [149] Bidart-Jiménez, C. "Glosario de mareas y corrientes." Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile, Valparaíso (1992).
- [150] Avilés Port Authority. Proyecto de gestión ambiental de los materiales de dragado del Puerto de Avilés. Avilés: 2004.
- [151] Gunn, Kester, and Clym Stock-Williams. "On validating numerical hydrodynamic models of complex tidal flow." *International Journal of Marine Energy* 3 (2013): e82-e97.
- [152] Hyman JM. Numerical methods for tracking interfaces. *James M. Hyman. Interface* 1984;12:396-407.

ANEXO



Tidal current energy potential assessment by a two dimensional computational fluid dynamics model: The case of Avilés port (Spain)



Juan Manuel González-Caballín^a, Eduardo Álvarez^{b,*}, Antonio José Gutiérrez-Trashorras^a, Antonio Navarro-Manso^b, Joaquín Fernández^b, Eduardo Blanco^a

^a University of Oviedo, Department of Energy, Campus de Gijón, 33204 Gijón, Spain

^b University of Oviedo, Department of Energy, Campus de Barredo, 33600 Mieres, Spain

ARTICLE INFO

Article history:

Received 4 February 2016

Received in revised form 25 March 2016

Accepted 18 April 2016

Keywords:

Tidal energy

Computational Fluid Dynamics (CFD)

Averaged velocity

High resolution

ABSTRACT

Tidal energy has significant potential yet to be developed. One of the key areas of the research lines being developed is the ability to perform accurate computational models in order to make a full appraisal of kinetic energy potential in different areas through tide movements. So far, due to the limitations of computational resources and the extension of the geographical domains, existing models have mainly used simplifications such as low resolution mesh sizes and velocity profile approximations in the vertical dimension. The investigation put forward includes a high resolution two dimensional equivalent model of the zone studied using a longitudinal section with depth and length dimensions, as well as a simulation methodology to study the velocity field in different sections. The model can be used in cases of channels of high width compared to the depth. With such data, kinetic power and energy of tidal currents can be predicted. Both, model and methodology have been applied and validated to the specific case of the estuary of Avilés port, thereby obtaining a new perspective in the hydrodynamic study as well as a tidal current energy potential assessment.

© 2016 Elsevier Ltd. All rights reserved.

1. Introduction

World energy demand was 21,431 TW h in 2012 [1]. Electricity production from tidal energy has an estimated potential of 22,000 TW h/year [2] worldwide. But currently, applying proven conversion efficiencies, only productions of 1000 TW h/year worldwide [2] and 105.4 TW h/year in Europe [3] (mainly in the UK, France, Ireland, Holland, Germany and Spain) could be at our disposal. Despite being a continuous and predictable energy resource, there are still important challenges, such as: tidal conversion systems efficiencies, high investments, operation and maintenance costs and potentially high environmental impact. However, tidal energy potential for the future is now attracting considerable interest and investment [4].

The origin of tidal energy emanates from the periodic movements of rise and fall in sea water level due to the gravitational pull of the moon and the sun, and their relative position with respect to

the earth. These movements produce marine currents near the coast denominated as tidal currents [5].

To date, the majority of energy production comes from marine tidal dams built between 1960 and 1980. The electrical power generation of such dams is obtained by the same principles as hydro-power generation except that the former exploit both tidal flows in opposite directions. Although this technology is already well tested and can be considered reliable, the facilities of this type cause a high environmental impact affecting the ecosystem and involve high construction costs [6]. There are only five tidal dams in operation today: La Rance (240 MW) in France, Annapolis (20 MW) in Canada, Kislaya Guba (400 kW) in Russia, Creek Jangxia (500 kW) in China [5] and Sihwa Lake (254 MW) in South Korea [7].

In the last decade, electricity generation in tidal dams has been relegated in favor of new designs of marine current turbines, with similar designs as wind turbines. The first approach was based on relatively high power turbines located in offshore areas to minimize environmental impact. These ventures imply high investments and operation and maintenance costs. For this reason, although many prototypes are currently being tested [8,9], there are very few specific installations that obtain power directly from the tidal currents in operation (e.g. Strangford Lough SeaGen in the UK) [10].

* Corresponding author.

E-mail addresses: gonzalezjuan@uniovi.es (J.M. González-Caballín), edualvarez@uniovi.es (E. Álvarez), gutierrezantonio@uniovi.es (A.J. Gutiérrez-Trashorras), navarroantonio@uniovi.es (A. Navarro-Manso), jffrancos@uniovi.es (J. Fernández), eblanco@uniovi.es (E. Blanco).

Recent projects are focused on designing a new approach based on microturbines arranged in tidal arrays [11], suitable for onshore/nearshore locations, where there is high kinetic energy due to the influence of tides, and with low environmental impact. Their situation makes it possible to use the energy generated in nearby power consumption points, such as cities or ports [12] reducing the investment and operational costs associated. The Maine project in the Bay of Fundy (Canada) [13], the Enermar project in the Strait of Messina (Italy) [14] and the RITE project in New York [15] are examples of current pre-commercial developments.

Making an accurate estimation of the energy potential, optimization of microturbine designs and microturbine plant locations are key factors to guarantee feasibility of a tidal array [16]. In reference to the first one new investigations are focused on defining methodologies for estimating and measuring the tidal stream resource at potentially suitable sites [17]. With respect to the second point new microturbine designs are oriented towards enhancing its efficiencies as well as the application in low velocity scenarios, 0.2 or 0.3 m/s in some cases [8]. In reference to the third point (plant locations), new publish findings are focused on evaluating the influence of the specific array placement in the plant feasibility [18]. With respect to the economical parameters of tidal current turbine farms, the work presented in [19] shows a model which integrates the operation and maintenance costs with the hydrodynamic energy generation output, as a base of feasibility studies.

Up to now, different software models have been used to study tidal flows in large areas. Due to the high consumption of computational resources two different simplifications have been usually included: using a coarse mesh size (resolutions >100 m) and eluding a precise study of the velocity variations in the vertical dimension.

According to the second simplification two types of models have been developed: two-dimensional (2D) models that use only the horizontal equations or vertically integrated equations, and three dimensional (3D) models, taking into account the variations of the horizontal velocity components with depth (usually employing the hydrostatic pressure assumption). Neither of these methods calculate the vertical component of the velocity resulting, in some cases, in inaccurate estimations of the available kinetic energy [20].

A tidal energy study of the coast of New Jersey was realized using the 2D mode of the Finite Volume Coastal Ocean Model (FVCOM) code [21]. This model uses vertically integrated values of the variables. The study published in [22] presents an assessment of the tidal resource in two locations of the coast of Ireland. It compares results found with the 2D numerical model MIKE 21 (water surface velocities and predefined vertical velocities profiles) with in-site velocities measurements. It was found that in one of these locations the water profile for low speeds do not follow a power law neither a log law.

3D models have been used for tidal studies of the Irish Sea and the North West European shelf seas, using Regional Ocean Modelling System (ROMS) [16–23] code, and the Bay of Algeciras [24] using the Massachusetts Institute of Technology general circulation model (MITgcm). These two codes solve the Reynolds–Averaged Navier–Stokes (RANS) equations with hydrostatic simplifications. With the same simplification, a study of the tidal resource in the Ria de Ribadeo using 3D baroclinic Navier–Stokes has been recently published [25].

The Avilés port is located in a river estuary in the north coast of Spain (Fig. 1) and flows into the Cantabrian Sea, southernmost part of the Bay of Biscay. It is basically a channel of 5000 m length with an average width of 160 m and a nearly constant depth of 11.5 m.

The investigation presents a high resolution two dimensional (2D) equivalent model of the port based on a longitudinal section



Fig. 1. Avilés port longitudinal section.

(including depth and length) which is justified by the large width of the channel compared to its depth. Additionally a simulation methodology using Computational Fluid Dynamics (CFD) is applied to obtain the velocity field in different sections. With this information a complete evaluation of its tidal current energy potential was obtained.

2. Two dimensional model

2.1. Geometric model

The 2D equivalent geometric model has been obtained based on a longitudinal section of the port along the central line of the channel (Fig. 1).

The model, shown in Fig. 2, is a rectangle of 20 m-height, enough space to simulate the biphasic (water, air) flow, and a length of 5005 m: 5 m for a water flow inlet and the 5000 m of

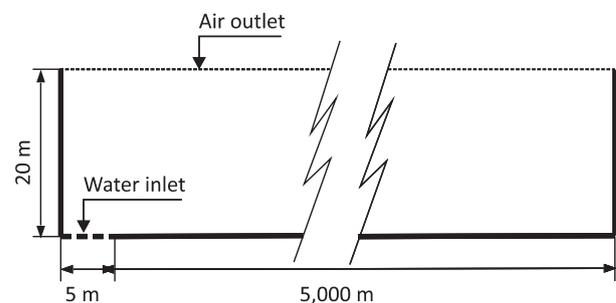


Fig. 2. 2D equivalent model.

the port length. The water flow inlet is located at the left bottom side of the model in order to apply a boundary condition that reproduces the effect of the tides in the sea level. The model's upper part is open so that air can flow in and out.

2.2. Numerical model

The simulations were performed with the commercial CFD software ANSYS FLUENT V13.0, solving the Unsteady Reynolds-averaged Navier–Stokes (URANS) equations with a biphasic scheme. This numerical model is obtained by meshing the geometry into different small cells in which the flow equations must be solved, the application of boundary conditions and finally the resolution of the discretized equations.

2.2.1. Mesh

A structured mesh has been developed for the entire domain, employing rectangular cells because of their favourable adaptation to the geometry (Fig. 3).

The mesh used for the calculations has about 10⁶ cells. Refined meshes have also been tested without showing noticeable changes in the results obtained.

2.2.2. Flow equations

The Volume Of Fluid (VOF) approach has been selected for the biphasic (water and air) modelling. Its formulation is designed for two or more immiscible fluids where the position of the interface between the fluids is of interest [26].

Variables and properties (density, viscosity, etc.) of each phase are volume averaged values, calculated using a volume fraction ratio of each phase for every cell. The model includes continuity equations for each phase and the URANS momentum equation for the entire domain. Those equations allow describing each fluid movement as well as tracking the water–air interface (considering both as incompressible flows).

For interpolation near the interface, a piecewise-linear interface calculation scheme is used [27].

2.2.3. Boundary conditions

To solve the equations during the tides simulation, a set of boundary conditions were selected.

In the case of the air outlet, a stable pressure value of the standard atmospheric pressure (101,325 Pa) was set, while for the water inlet a sinusoidal pressure function (1) was used, which simulates the tides effects in the sea level. This boundary condition is applied by a user-defined-function (UDF).

$$P(t) = P_0 + \left(\frac{A_p}{2}\right) \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot t}{T}\right) \tag{1}$$

$P(t)$ is the total pressure applied in the water inlet, T is the tidal period. P_0 is the pressure due to the mean sea level and A_p is the pressure due to the amplitude of tides. They are calculated as follows,

$$P_0 = \rho \cdot g \cdot h_o \tag{2}$$

$$A_p = \rho \cdot g \cdot h_p \tag{3}$$

where ρ , g are the sea water density and gravity and h_o , h_p are respectively the mean sea level and the amplitude of the tide for a particular day.

The values used in this case are $T = 44,700$ s corresponding to semidiurnal tides in the case of the Bay of Biscay, $\rho = 1025$ kg/m³ and $g = 9.8$ m/s². The values of h_o and h_p were selected from the specific data of the Avilés port.

2.2.4. Solution parameters

In the biphasic model, air and water were considered to have constant densities and dynamic viscosities. The values used were a density of 1.225 kg/m³ and a dynamic viscosity of 1789 · 10⁻⁵ kg/m s for the air; a density of 1025 kg/m³ and dynamic viscosity of 1003 · 10⁻³ kg/m s for the water.

To resolve the coupling between pressure and velocity fields in the Navier–Stokes equations, the transient form of the Pressure-Implicit with Splitting of Operators (PISO) algorithm was used. In this specific case, as the flow is incompressible and the energy equation is not used (segregated solver), an algorithm to couple pressure and velocity is needed. Instead of the traditional iterative SIMPLE algorithm, the non-iterative predictive–corrective PISO algorithm has been used, because this algorithm was explicitly developed to accelerate unsteady calculations.

The spatial and temporal derivatives of the fluid flow governing equations were calculated by means of a second-order discretization, and for the pressure interpolation the PREssure STaggering Option (PRESTO) scheme has been used instead of the standard one because it is better suited for the steep pressure gradients of the biphasic flows.

As VOF models need a single set of scalar equations shared by phases to define turbulence effects, in this case, the three equations of the k-epsilon Re-Normalisation Group (RNG) model was selected for both (air and water) phases. This turbulence model has a good accuracy for recirculating and swirling flows.

3. Simulation methodology

The simulation methodology consists on testing the numerical model during spring tide and neap tide complete cycles (44,700 s per cycle). For that purpose, specific tidal values for Avilés port were supplied by the Public Body Puertos del Estado (Table 1) and used in the UDF of the sea level boundary condition.

To evaluate the water velocity field, the Avilés port model was divided in sections, each 50 m long (Fig. 4). The sections were identified by the distance to the river mouth ($x = 0$, origin of distances).

The model was validated comparing its results with the maximum values (during a tide cycle) of the averaged water velocity in a vertical section (depth-averaged) measured in the port. This

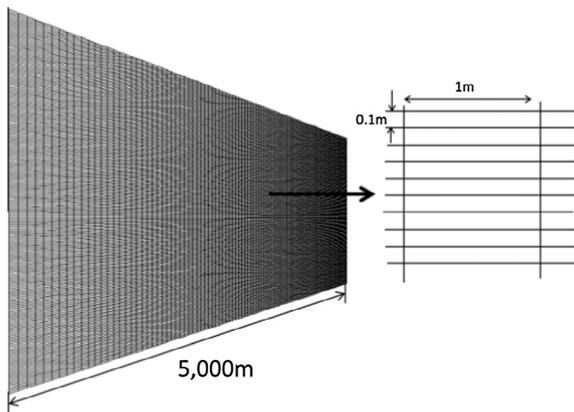


Fig. 3. Perspective and detail of meshed equivalent model.

Table 1

Avilés port spring and neap tide data.

	Mean sea level (m)	Amplitude of tides (m)
Spring tide	12.250	3.94
Neap tide	12.195	1.27

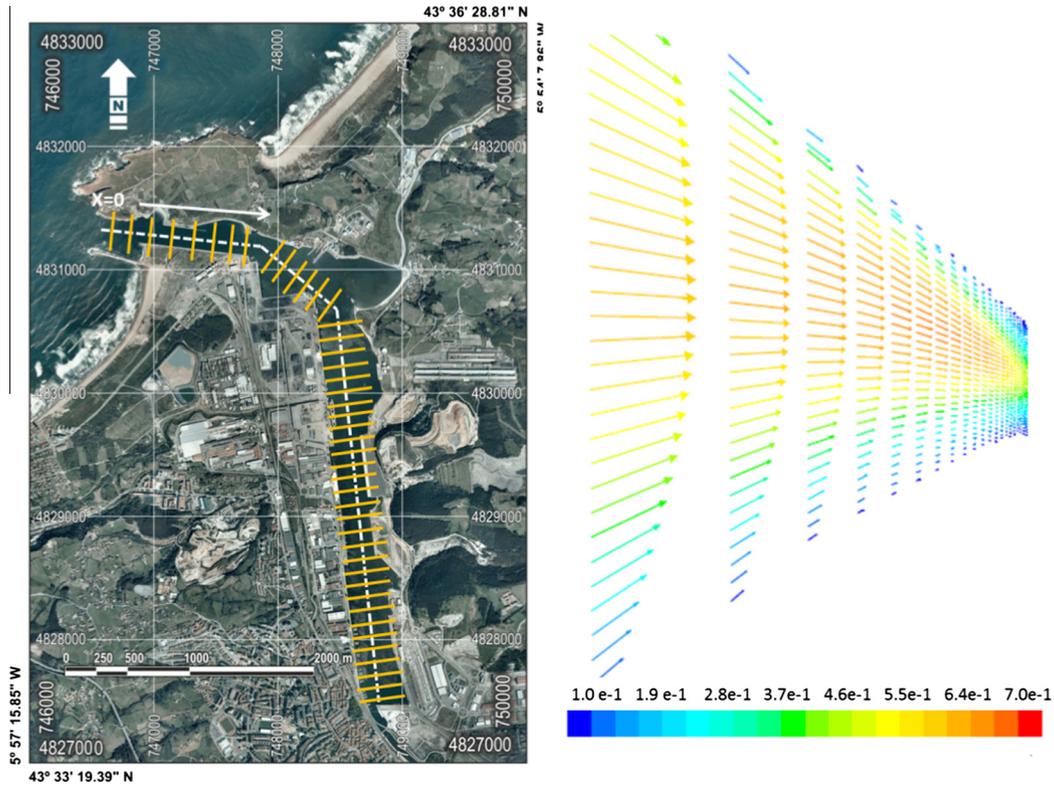


Fig. 4. Cross-sectional velocity field analysis.

data has been supplied by the Avilés Port Authority for spring tide (Table 2).

A time step of 5 s was used to simulate the model during the 44,700 s of each cycle. Enough iterations per time step were used to ensure convergence of the results.

4. Results and discussion

The required time for each simulation (spring tide and neap tide) was 7 days on a computer with a i-7 processor of 8 cores working in parallel.

4.1. Sea level, maximum velocities and model validation

During the two tests, sea levels obtained in the different sections of the model correspond to the pressure inlet applied. In Fig. 5 there is an example of their evolution during ebb tide of the spring tide test.

In the spring tide test, the maximum velocities of the averaged section are represented in Fig. 6. The higher values are about 0.35–0.4 m/s at the port mouth, with an exponential decay in the following sections.

Additionally, the results are quite similar to the velocity data supplied by the Avilés Port Authority. This can be considered as a validation of the global results obtained with the model proposed.

Table 2 Avilés port maximum velocities.

Cross section identification	Position, x (m)	Velocity (m/s)
P ₁	100	0.33
P ₂	1500	0.25
P ₃	3000	0.16

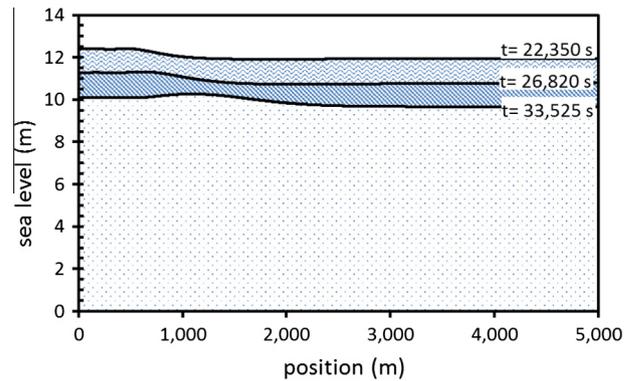


Fig. 5. Evolution of sea level during ebb tide.

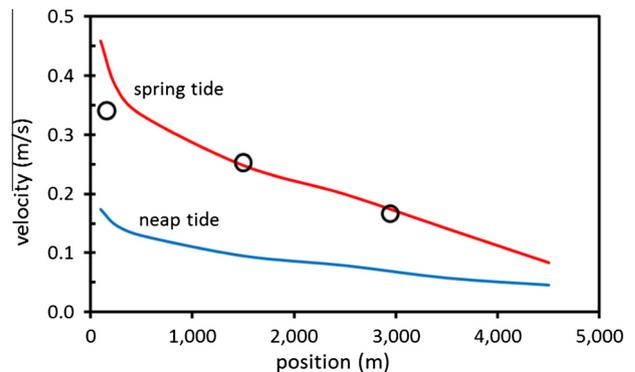


Fig. 6. Maximum averaged velocity values (spring and neap tide test). P₁ P₂ P₃ measured data.

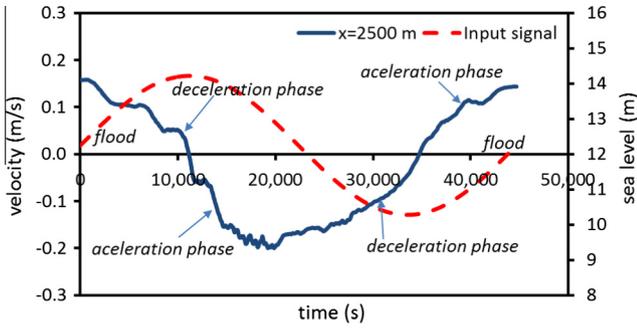


Fig. 7. Averaged water velocity at section $x = 2,500$ m vs input signal.

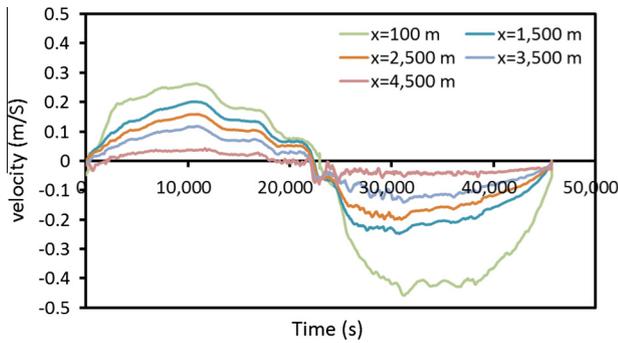


Fig. 8. Averaged water velocity cycles at different sections (spring test).

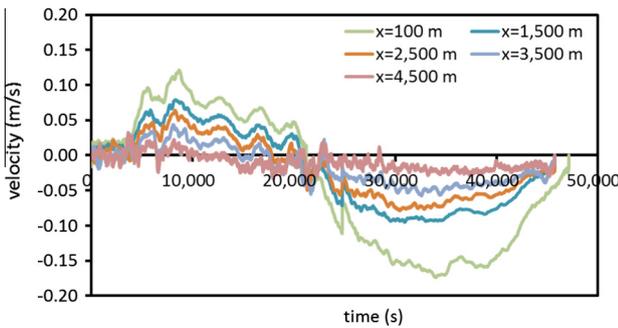


Fig. 9. Averaged water velocity cycles at different sections (neap test).

The results of the neap tide test show also maximum velocities of the averaged section around 0.18–0.20 m/s at the port mouth, and an exponential decay of values as the distance from the mouth increases.

4.2. Velocity cycles

In both tests (spring and neap), the evolution of the averaged velocity per section versus time follows a cosine wave tendency that corresponds to the derivative of the sinusoidal sea level variation applied. Fig. 7 shows the averaged water velocity in section $x = 2500$ m versus the sea level. The period of each velocity cycle is approximately of 44,700 s, corresponding to the semidiurnal variation.

In the figure, the flood and ebb tides can be also noticed, as well as their acceleration and deceleration phases.

Signal noise and asymmetries between positive and negative cycles are supposed to be consequences of the water reflections at the end of the port.

Figs. 8 and 9 show how the different averaged velocity values obtained decrease with the section distance from the mouth.

4.3. Velocity profiles

Velocity profiles in each section may be obtained using the model. Figs. 10 and 11 include complete acceleration and deceleration sequences during flood tide as well as the same sequences during ebb tide. The first one at section $x = 100$ m from the channel mouth and the second one at $x = 2500$ m (middle of the channel).

Both figures show that the boundary layer in the different profiles remains close to the channel floor with less than 1 m of height. It can be said that the main influences involved in the profiles forms are the unsteady processes of acceleration–deceleration of the water during flood and ebb tides.

The maximum value of the velocity tends to be displaced towards the floor, which it is more evident in the channel mouth (Fig. 10) than in the middle of the channel (Fig. 11). The displacement is coherent with experimental profiles shown in [28]. It is thought that this may be related to the water inlet from the sea, because of the great depth change between the open sea and the port mouth. In the model, the boundary condition has been placed in the channel floor to try to simulate this effect and be consistent with the real situation.

Another possibility which has been considered is the tendency of the unsteady process of flood-ebb tide to generate a longitudinal pressure gradient along the entire channel. In the present case, the elevation of the channel floor is basically the same everywhere, so the water movement is created by the variation of the level surface between different longitudinal positions. During flood tide, for example, the water level near the channel mouth is higher than in the other sections. As the surface pressure is identical everywhere, this makes the hydrostatic pressure at the floor of the channel mouth higher than in the other sections. This difference of longitudinal forces between the floor and surface (stronger at

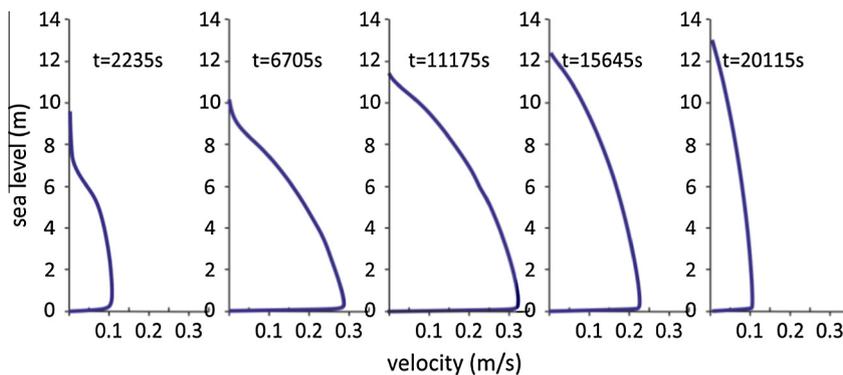


Fig. 10. Velocity profiles during flood tide at section $x = 100$ (spring test).

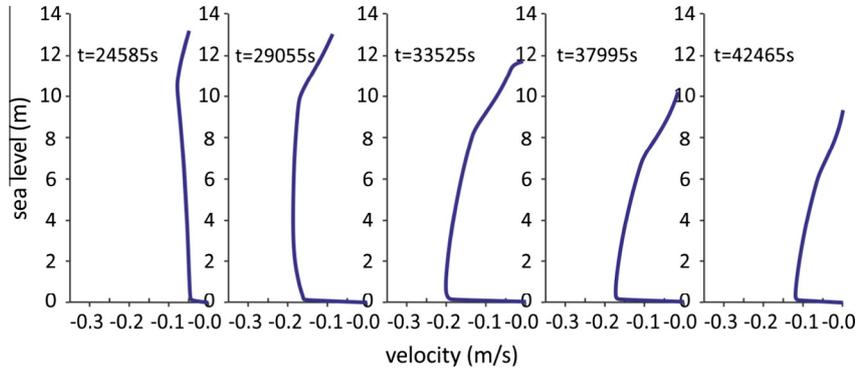


Fig. 11. Velocity profiles during ebb tide at section $x = 2500$ (spring test).

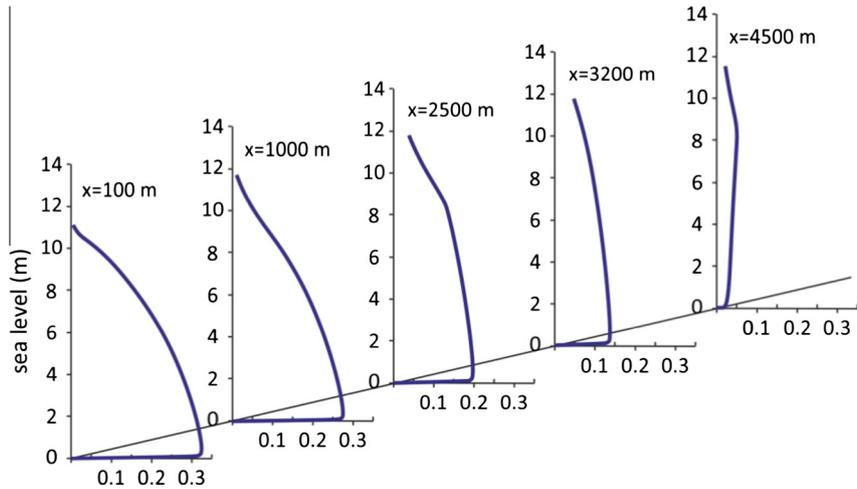


Fig. 12. Velocity profiles during time instant $t = 11,175$ s of flood tide at different sections (spring test).

the floor than at the surface) is believed to be responsible for the greater flow acceleration and therefore the higher velocity values closer to the floor. Furthermore, this process is complicated by the sinusoidal variation of the input sea level produced by the tide and the resulting unsteady accelerations and decelerations.

The location of the maximum velocity close to the channel floor is one of the factors responsible of the reduced height of the floor boundary layer along the channel.

Fig. 10 shows how during flood tide the acceleration process accentuates the variation of velocity with depth while in the deceleration process the variation is reduced. The same effect appears but with less intensity in the ebb tide (Fig. 11).

The profiles found differ significantly from the velocity profiles typically assumed in the simulation models, highlighting the importance of studying the evolution of the velocity in the vertical dimension.

Fig. 12 shows the velocity profiles at different sections of the channel for the instant of maximum velocity during flood tide. There is not an appreciable growth of the boundary layer along the channel length. However the velocity variation with depth is much more pronounced the closer the sections are to the channel mouth.

4.4. Tidal current power and energy

The available tidal current power per unit of area is calculated using Eq. (4):

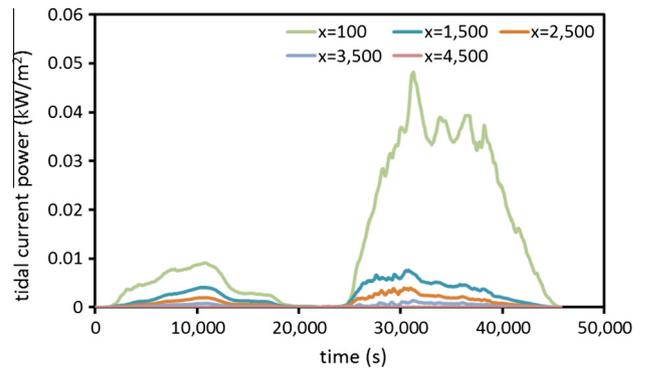


Fig. 13. Tidal current power at different sections (spring test).

$$P_i(t) = \left(\frac{1}{2}\right) \cdot \rho \cdot v_i^3(t) \tag{4}$$

where $P_i(t)$ and $v_i(t)$ are the values of the tidal current power and averaged velocity at the section i ; ρ is the seawater density.

Tidal current power values in each section are obtained using velocity data for spring and neap tides. Figs. 13 and 14 show the values at different sections.

For each spring or neap cycle, the tidal current energy per cycle is calculated integrating the power functions. And the annual tidal current energy per section is calculated as follows (5):

$$E_{YEAR} = E_{AV_cycle} \cdot 705 \tag{5}$$

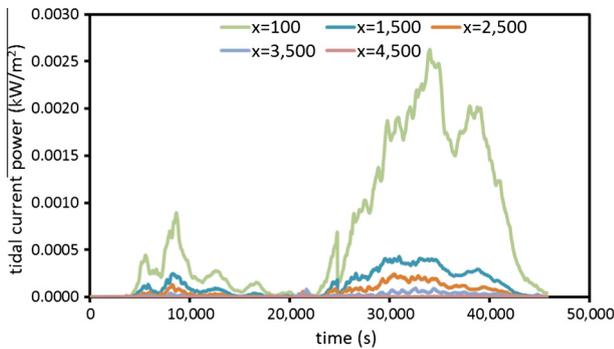


Fig. 14. Tidal current power at different sections (neap test).

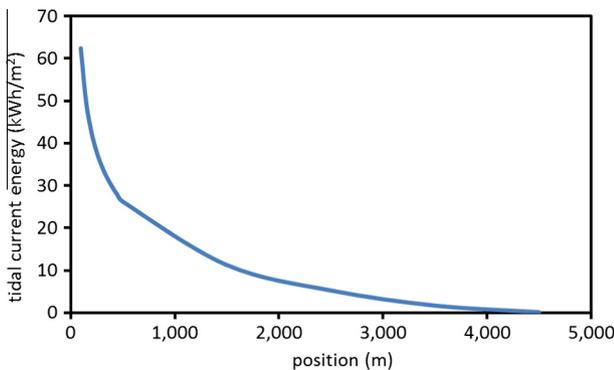


Fig. 15. Tidal current energy at different sections.

where E_{YEAR} is the total amount of tidal current energy that can be obtained per m^2 in each section, E_{AV_cycle} is the average value of energy per cycle of 44,700 s considered as $(E_{SPRING_cycle} + E_{NEAP_cycle})/2$ – taking into account that spring and neap cycles alternate approximately every 7 days in the semidiurnal tide- and 705 is the number of cycles per year.

Fig. 15 shows the results of tidal current energy in the different obtained with the model. The maximum value, 60 kWh/m², is obtained at the port mouth with an exponential diminution as distance from the mouth increases.

5. Conclusions

In this research a 2D equivalent model and a study methodology were presented in order to evaluate the tidal current energy potential derived from tide movements. The model uses a vertical section so it is able to take into account channel depth effects.

Both model and methodology were applied to the Avilés port. The grid of the model uses rectangular cells where the continuity and Unsteady Navier–Stokes (URANS) equations of the biphasic (air–water) VOF approach are solved. The model employs a user defined function to include the effects of semidiurnal tides. With the selection of adequate parameters the simulation was performed and validated. Different results were obtained for each port section: water surface elevations, averaged velocities cycles and velocity versus depth profiles. With these data current tidal power and energy were calculated for each section. Maximum energy values are obtained at the port mouth decreasing exponentially as the distance from the mouth increases.

References

- [1] Iea. Key world energy statistics. Int Energy Agency; 2012. <http://dx.doi.org/10.1787/22202811>.
- [2] Sandén B. Systems perspectives on renewable power 2014:2014.
- [3] Johansson TB, Burnham L. Renewable energy: sources for fuels and electricity 1993:1–9.
- [4] Foley T, Thornton K, Hinrichs-rahlwes R, Sawyer S, Sander M, Taylor R, et al. Renewables 2015 global status report; 2015.
- [5] O'Rourke F, Boyle F, Reynolds A. Tidal energy update 2009. Appl Energy 2010;87:398–409. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2009.08.014>.
- [6] Hooper T, Austen M. Tidal barrages in the UK: ecological and social impacts, potential mitigation, and tools to support barrage planning. Renew Sustain Energy Rev 2013;23:289–98. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2013.03.001>.
- [7] Bae YH, Kim KO, Choi BH. Lake Sihwa tidal power plant project. Ocean Eng 2010;37:454–63. <http://dx.doi.org/10.1016/j.oceaneng.2010.01.015>.
- [8] Canada NR. Technology evaluation of existing and emerging technologies 2006;3502:1–48.
- [9] The European Marine Energy Centre (EMEC). n.d. <<http://www.emec.org.uk/>> [accessed 1 December 2015].
- [10] Devine-Wright P. Place attachment and public acceptance of renewable energy: a tidal energy case study. J Environ Psychol 2011;31:336–43. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvp.2011.07.001>.
- [11] Vennell R, Funke SW, Draper S, Stevens C, Divett T. Designing large arrays of tidal turbines: a synthesis and review. Renew Sustain Energy Rev 2015;41:454–72. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2014.08.022>.
- [12] Alvarez EA, Manso AN, Gutierrez-Trasorras AJ, Francos JF, Secades M. Obtaining renewable energy from tidal currents in the Avilés port: new services for citizens. In: IEEE Int Conf New Concepts Smart Cities Foster Public Priv Alliances.
- [13] Ocean Renewable Power Company. n.d. <<http://www.orpc.co/content.aspx?p=h3jCHh6gcg%3d>> [accessed 10 September 2015].
- [14] Previsic M, Siddiqui O, Hagerman G, Robinson M. Survey and characterization tidal in stream energy conversion (TISEC) devices. Epr; 2005.
- [15] Ocean Renewable Energy Coalition (OREC). Verdant power I. Marine and hydrokinetic technology background and perspective for New York State, Final report. New York; 2012.
- [16] Lewis M, Neill SP, Robins PE, Hashemi MR. Resource assessment for future generations of tidal-stream energy arrays. Energy 2015;83:403–15. <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2015.02.038>.
- [17] Legrand C. Black and veatch. Emecc. Assessment of Tidal Energy Resource; 2009.
- [18] Culley DM, Funke SW, Kramer SC, Piggott MD. Integration of cost modelling within the micro-siting design optimisation of tidal turbine arrays. Renew Energy 2016;85:215–27. <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2015.06.013>.
- [19] Li Y, Lence BJ, Calisal SM. An integrated model for estimating energy cost of a tidal current turbine farm. Energy Convers Manage 2011;52:1677–87. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2010.10.031>.
- [20] Evans P, Mason-Jones A, Wilson C, Wooldridge C, O'Doherty T, O'Doherty D. Constraints on extractable power from energetic tidal straits. Renew Energy 2015;81:707–22. <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2015.03.085>.
- [21] Tang HS, Qu K, Chen GQ, Kraatz S, Aboobaker N, Jiang CB. Potential sites for tidal power generation: a thorough search at coast of New Jersey, USA. Renew Sustain Energy Rev 2014;39:412–25. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.051>.
- [22] O'Rourke F, Boyle F, Reynolds A. Ireland's tidal energy resource; An assessment of a site in the Bulls Mouth and the Shannon Estuary using measured data. Energy Convers Manage 2014;87:726–34. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2014.06.089>.
- [23] Neill SP, Hashemi MR, Lewis MJ. Tidal energy leasing and tidal phasing. Renew Energy 2015;85:580–7. <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2015.07.011> [in press].
- [24] Sammartino S, García Lafuente J, Sánchez Garrido JC, De los Santos FJ, Álvarez Fanjul E, Naranjo C, et al. A numerical model analysis of the tidal flows in the Bay of Algeciras Strait of Gibraltar. Cont Shelf Res 2014;72:34–46. <http://dx.doi.org/10.1016/j.csr.2013.11.002>.
- [25] Ramos V, Carballo R, Sanchez M, Veigas M, Iglesias G. Tidal stream energy impacts on estuarine circulation. Energy Convers Manage 2014;80:137–49. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2014.01.027>.
- [26] Hirt C, Nichols B. Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries. J Comput Phys 1981;39:201–25. [http://dx.doi.org/10.1016/0021-9991\(81\)90145-5](http://dx.doi.org/10.1016/0021-9991(81)90145-5).
- [27] Youngs David. Time-dependent multi-material flow with large fluid distortion. In: Morton KW, Baines MJ, editors. Numer Methods Fluid Dyn. New York: Academic Press; 1982. p. 273–85.
- [28] Gunn K, Stock-Williams C. On validating numerical hydrodynamic models of complex tidal flow. Int J Mar Energy 2013;3–4:e82–97. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijome.2013.11.013>.