

GENERALIZACIÓN DE UN MODELO DE VIENTO DE MASA CONSISTENTE PARA EL CASO *OFFSHORE*

Alejandra González*, Gustavo Montero, Rafael Montenegro, Eduardo
Rodríguez y José María Escobar

Instituto Universitario de Sistemas Inteligentes y Aplicaciones Numéricas en Ingeniería
Universidad de Las Palmas de Gran Canaria
35017 Las Palmas de Gran Canaria
e-mail: alejandra.gon@gmail.com, {gustavo,rafa,barrera}@dma.ulpgc.es, jescobar@dsc.ulpgc.es,
web: <http://www.dca.iusiani.ulpgc.es/proyecto0507>

Palabras clave: Modelos de masa consistente, Elementos finitos, Mallas adaptadas, Modelización numérica de campos de viento, Perfil de viento *offshore*

Resumen. *En este trabajo se construye un perfil de velocidades de viento generalizado relativo a un modelo de masa consistente. El objetivo es construir un campo inicial de viento que sea válido tanto para el caso terrestre como para el offshore. Nuestro modelo de masa consistente se resuelve mediante elementos finitos utilizando una malla de tetraedros adaptada a la orografía y a la rugosidad del terreno. Seguidamente esta malla es suavizada y transformada de tal forma que la línea de costa queda perfectamente definida por una interpolación de aristas de la malla. Esto se consigue proyectando algunos nodos de la malla inicial sobre la curva que define la línea de costa. Los puntos situados sobre el mar se clasifican como offshore, o no offshore, en función del parámetro de flotabilidad y de la distancia a la costa medida en la dirección del viento predominante, asignándoseles el perfil vertical correspondiente a cada caso. La corrección introducida en este perfil vertical de viento consiste en añadir un término lineal al perfil logarítmico que tiene en cuenta la altitud del punto y la altura de la capa de inversión. Para comprobar el efecto del cambio introducido, presentamos un experimento numérico resuelto con y sin la consideración de zonas offshore.*

Este trabajo ha sido financiado por el Ministerio de Educación y Ciencia del Gobierno de España y FEDER, proyecto: CGL2004-06171-C03-02/CLI.

1. INTRODUCCIÓN

Los modelos de diagnóstico generan campos de viento que satisfacen algunas condiciones físicas, si la única ecuación impuesta es la ley de la conservación de la masa, estamos definiendo un modelo de masa consistente. La simplicidad relativa de los modelos de diagnóstico los hace atractivos desde el punto de vista práctico, puesto que no requieren muchos datos de entrada y pueden ser utilizados fácilmente. Sin embargo, los modelos de diagnóstico no consideran los efectos térmicos ni aquellos debidos a los gradientes de presión. En consecuencia, con estos modelos no pueden ser simulados ciertos problemas como las brisas marinas, a menos que dichos efectos sean incorporados en los datos de viento iniciales empleando observaciones realizadas en localizaciones seleccionadas. Los modelos primitivos 2-D de diagnóstico no consideraban la orografía del terreno ni el perfil vertical del viento. En ellos se construía un campo de viento interpolado teniendo en cuenta únicamente la distancia de los nodos a las estaciones de medida y a continuación se resolvía el problema elíptico bidimensional que surge de la discretización en un plano. Hoy en día, en los problemas definidos sobre terreno complejo, es esencial tener mallas de alta calidad para la discretización de los dominios estudiados. La mayoría de los modelos existentes trabajan normalmente con mallas regulares. Esta estrategia no es aplicable para problemas con terreno complejo, puesto que el tamaño de los elementos debe ser muy pequeño para poder capturar la información digital del mapa. En este caso, habría regiones sin detalles finos donde no sería necesario un tamaño de elemento tan pequeño. Esto nos conduciría finalmente a grandes sistemas lineales de ecuaciones y mayores costes computacionales para resolverlos. Finalmente, aunque los modelos de masa consistente se utilizan ampliamente, también son frecuentemente criticados porque sus resultados dependen fuertemente de algunos parámetros gobernantes. Estos parámetros se aproximan generalmente usando criterios empíricos.

Nuestros primeros modelos 3-D [1, 2] poseían algunas de estas limitaciones. Nuestro modelo original [1] se basaba en elementos finitos y empleaba mallas no adaptadas. En el modelo propuesto en [2] aún trabajábamos con mallas regulares no adaptadas, pero se introdujeron en él ciertas mejoras, tales como la discretización mediante diferencias finitas (lo que simplificaba la generación de la malla) y el inicio del uso de algoritmos genéticos simples para la estimación de parámetros. En [3], presentamos un nuevo modelo de elementos finitos que utiliza mallas adaptativas no estructuradas de tetraedros, con elementos de pequeño tamaño donde sea necesario y manteniendo elementos mayores donde no se requiera un nivel de discretización importante. El modelo 3-D resultante contiene más nodos cerca de la superficie del terreno, donde necesitamos mayor precisión. En un post-proceso, la malla es suavizada y, si es necesario, desenredada usando el algoritmo de Escobar et al. [4] con el objetivo de mejorar su calidad. Además, se propuso un proceso de refinamiento local para mejorar la solución numérica [5] y el modelo incluye una herramienta para la estimación de parámetros basada en algoritmos genéticos [3]. Nuestro último modelo [6] incorpora mejoras en la generación de mallas de superficie, incluyendo

un procedimiento adaptativo para capturar la información sobre la orografía y la rugosidad simultáneamente, refinamientos locales adicionales en diferentes regiones del terreno y una técnica de suavizado para mejorar la calidad de la malla y mover sus aristas sobre líneas de contorno. Además se desarrolla una técnica para incluir nueva información sobre medidas de viento a diferentes alturas e intensidades de turbulencia.

En todos nuestros modelos se emplea un perfil logarítmico-lineal [7] para llevar a cabo la extrapolación vertical del viento. Según varios autores [8, 9, 10, 11], dicho perfil es válido tanto para zonas terrestres como sobre mar abierto. Sin embargo, también se ha encontrado, que debido a la proximidad a la tierra, el flujo se ve afectado por la discontinuidad tierra mar hasta distancias situadas alrededor de los 100 km [8, 9, 10, 12, 13, 14]. Esto nos lleva a pensar que los parques eólicos marinos (*offshore*) estarán afectados por esta variación del régimen de flujo, por lo es de esperar un cierto error en la predicción del viento. La expansión actual de los parques eólicos *offshore* nos ha llevado a profundizar en este tema para mejorar nuestro modelo de viento y proporcionar, así, resultados más precisos y fiables con los que poder trabajar. En la sección 2 expondremos nuestra técnica de generación de mallas de superficie, incluyendo las últimas mejoras realizadas. La sección 3 trata sobre los perfiles de viento a emplear en función de la consideración que demos a la zona de estudio (es decir, si es *offshore* o no). Desarrollamos experimentos numéricos para la evaluación de los perfiles y los incluimos en la sección 4. Finalmente, resumimos las conclusiones derivadas de la realización de este estudio así como las líneas futuras de investigación necesarias para completarlo y mejorarlo.

2. GENERACIÓN DE LA MALLA

Los modelos de masa consistente se han usado ampliamente en la modelización tridimensional del viento mediante el método de elementos finitos. En general, estos problemas se definen sobre regiones con terreno complejo y longitud de rugosidad variable, por tanto, será necesaria una discretización apropiada de la zona estudiada. Además, con frecuencia existen puntos donde se necesita mayor precisión. Siguiendo la técnica propuesta en [15, 16, 17], hemos utilizado un método para construir mallas de tetraedros que se adaptan, simultáneamente, a la orografía del terreno y a la longitud de rugosidad. Esto se lleva a cabo mediante el uso de un proceso de refinamiento/desrefinamiento en una malla 2-D correspondiente a la superficie del terreno, empleándose para ello dos parámetros de desrefinamiento diferentes. Además, en algunas ocasiones es necesaria una precisión mayor alrededor de ciertos puntos previamente definidos por el usuario, tales como estaciones u otros puntos de control en la superficie del terreno (en parques eólicos). En tales casos, la malla debe ser refinada alrededor de estos puntos, aplicándose un refinamiento local en la malla [5] tras el procedimiento anterior. Finalmente, en múltiples aplicaciones existen líneas de contorno que definen propiedades importantes de la superficie del terreno, por ejemplo, las líneas de costa o los contornos de longitud de rugosidad [4, 18]. Con el fin de incluir dichas líneas en la malla, se ha desarrollado un procedimiento de suavizado. Este procedimiento se basa en el movimiento de los nodos, manteniendo las conexiones

de la malla, de forma que una lista de aristas se superpone en tales líneas a la vez que la calidad de la triangulación mejora [6].

2.1. Malla de tetraedros adaptada a la orografía y a la rugosidad del terreno

El proceso de generación de la malla tridimensional comienza con la determinación de los nodos situados sobre la superficie del terreno. Su distribución debe estar adaptada a las características orográficas y de rugosidad con la finalidad de minimizar el número total de nodos necesario. El procedimiento construye inicialmente una secuencia de mallas encajadas $T = \{\tau_1 < \tau_2 < \dots < \tau_m\}$ a partir de una triangulación regular τ_1 de la zona rectangular de estudio, tal que el nivel τ_j se obtiene mediante un refinamiento global del nivel anterior τ_{j-1} aplicando el algoritmo 4-T de Rivara [19]. Todos los triángulos del nivel τ_{j-1} se dividen en cuatro subtriángulos mediante la introducción de un nuevo nodo en los centros de sus lados y uniendo el nodo introducido en el lado mayor con el vértice opuesto y los otros dos nuevos nodos. Por tanto, en el nivel de malla τ_j aparecen nuevos nodos, lados y elementos que reciben el nombre de propios del nivel j . El número de niveles m de la secuencia está determinado por el grado de discretización de la digitalización del terreno, es decir, el diámetro de la triangulación τ_m debe ser del orden del paso espacial de la digitalización (el paso espacial del mapa de longitud de rugosidad es frecuentemente mayor o igual que el del mapa orográfico). De esta forma aseguramos que esta malla regular es capaz de captar toda la información orográfica y de rugosidad mediante una interpolación de las cotas reales y de las longitudes de rugosidad en los nodos de la malla. Finalmente, definimos una nueva secuencia $T' = \{\tau_1 < \tau'_2 < \dots < \tau'_{m'}\}$, $m' \leq m$, aplicando el algoritmo de desrefinamiento [20, 21]. En este paso se introducen como datos los parámetros de desrefinamiento ε_h y ε_r que determinan la precisión con que se desea aproximar la topografía del terreno y su longitud de rugosidad, respectivamente. La diferencia en valor absoluto de las cotas resultantes en cualquier punto de la malla $\tau'_{m'}$ y su correspondiente cota real será menor que ε_h . Una condición similar se establece para la rugosidad y ε_r . Asimismo, el algoritmo de desrefinamiento (véase el algoritmo 1) utiliza toda la información de la genealogía de elementos y lados definida en la secuencia.

La condición de desrefinamiento tiene en cuenta los requerimientos de cota y rugosidad simultáneamente. Por un lado, consideramos el análisis la diferencia absoluta entre la cota exacta (normalmente referida a un valor interpolado del mapa digital) del nodo y el valor interpolado de las cotas correspondientes a los dos nodos extremos de su lado entorno, es decir, el lado en que ese nodo fue introducido en su punto medio durante el proceso de refinamiento. Por otro lado, llevamos a cabo el mismo análisis con la longitud de rugosidad. Si, simultáneamente, la primera diferencia, relacionada con la cota, es menor que ε_h y la segunda diferencia, relacionada con la longitud de rugosidad, es menor que ε_r , entonces el nodo podría ser eliminado, aunque en algunos casos deberá permanecer por razones de conformidad.

Destacamos que la malla bidimensional obtenida puede ser modificada al construir la triangulación de Delaunay en el dominio tridimensional [22], puesto que lo único que

Algoritmo 1 Algoritmo de desrefinamiento.

ENTRADA: Secuencia $T = \{\tau_1 < \tau_2 < \dots < \tau_m\}$.**for** $j = m$ hasta 2 **do** {Bucle en niveles de T }Para cada nodo propio de τ_j se evalúa la condición de desrefinamiento y se marcan nodos y lados que podrían ser eliminados mediante los vectores de desrefinamiento.Se asegura la conformidad del nuevo nivel de malla j minimizando la zona desrefinada.**if** algún nodo propio de τ_j permanece **then**Se definen nuevas conexiones nodales para el nuevo nivel j : τ_j^j .Se modifican los vectores de genealogía de τ_j^j y de τ_{j-1} .**else**El nivel actual j es eliminado de los vectores de estructura.Se modifican los vectores de genealogía de τ_{j-1} .**end if**

Los cambios en la malla se heredan a las mallas siguientes.

Se comprimen los vectores de estructura.

Se obtiene una nueva secuencia de mallas encajadas T^j . Esta secuencia es la entrada en la siguiente iteración del bucle. $T^j = \{\tau_1 < \tau_2 < \dots < \tau_{j-1} < \tau_j^j < \dots < \tau_{m_j}^j\}$.**end for**SALIDA: Secuencia desrefinada $T' = T^2 = \{\tau_1 < \tau_2' < \dots < \tau_{m'}'\}$.

necesitamos y conservamos es la posición de sus nodos. También nos interesa tener presente el nivel en que cada nodo es propio, para proceder a la generación de nodos en el interior del dominio [15, 16, 17].

La malla resultante, adaptada a la orografía y a la rugosidad, no es siempre suficiente para asegurar la exactitud requerida en el modelo numérico en algunas regiones del dominio donde sea necesaria una discretización más fina. Hemos resuelto este problema refinando la malla de la superficie del terreno en dichas regiones, tal que los nodos insertados no son eliminados tras el proceso de desrefinamiento. La función de espaciado vertical y el algoritmo de triangulación de Delaunay en 3-D, que completan nuestro generador de mallas tridimensional (véase [15, 16, 17]), producirán una malla de tetraedros refinada localmente en las regiones seleccionadas. Así, el usuario puede definir la forma y localización de estas regiones y el número de subdivisiones adicionales de triángulos que serán realizadas con el fin de obtener el tamaño de elemento requerido.

2.2. Suavizado y adaptación de la malla a la línea de costa

El movimiento de los nodos proporciona a la malla superficial la capacidad de adaptarse a una curva arbitraria. Supongamos que la malla superficial, M , es proyectable en un plano único P formando una malla paramétrica, N . Si C es una curva definida en P , nuestro objetivo es mover algunos nodos de N , proyectándolos en C , para obtener una interpolación de C mediante aristas de N . Hay que tener en cuenta que, asociada a esta

interpolación, existe una interpolación sobre M resultante de la transformación. Para alcanzar este objetivo tenemos que decidir qué nodos de N pueden ser proyectados en C sin invertir ningún triángulo de la submalla local. Con más exactitud, decimos que un nodo libre q es proyectable en C si existe algún punto de C , sea q' , tal que la submalla resultante $N(q)$ no contenga ningún triángulo invertido tras mover q a la posición de q' . En general, si q es proyectable, su posible posición en C no es única y, por tanto, debemos determinar la posición "óptima" para trasladar q . Para decidir cuál es la posición óptima de este nodo podríamos pensar en minimizar la función objetivo $|K_\eta^0|_n(\mathbf{x})$ [18] sujeta a la condición $\mathbf{x} \in C$. Sin embargo, esta función sólo funciona correctamente cuando $N(q)$ no está enredada. Para solucionar este problema proponemos modificar esta función objetivo siguiendo los criterios desarrollados en [4]. Esta modificación consiste en sustituir σ^0 por la función creciente positiva $h(\sigma^0)$, donde σ^0 es una cantidad que aparece en el denominador de $|K_\eta^0|_n(\mathbf{x})$ y que tiende a cero cuando el área del triángulo lo hace. De esta manera, los inconvenientes asociados con las singularidades de $|K_\eta^0|_n(\mathbf{x})$ son eliminados y la nueva función es suave en todo \mathbb{R}^2 . Si $|K_\eta'^0|_n(\mathbf{x})$ es la función objetivo modificada, el problema de encontrar la posición óptima para proyectar el nodo C se puede formular como,

$$\text{minimizar } |K_\eta'^0|_n(\mathbf{x}), \text{ sujeto a } \mathbf{x} \in C \quad (1)$$

La función objetivo $|K_\eta'^0|_n$ penaliza fuertemente los valores negativos de σ^0 , tal que, el proceso de minimización de (1) conduce a la construcción de una submalla local $N(q)$ sin triángulos invertidos, suponiendo que esto sea posible. Entonces, si $\bar{\mathbf{x}}$ es la posición que minimiza (1) y $\sigma^0(\bar{\mathbf{x}}) > 0$ para todo triángulo de $N(q)$, concluimos que q es proyectable en C y $\bar{\mathbf{x}}$ es su posición óptima.

La proyección de un nodo libre en C puede dar lugar a una malla local de muy baja calidad. Este efecto es paliado en parte tras el suavizado del resto de los nodos, siguiendo el procedimiento descrito en [18]. Además, hemos observado que la malla final tiene mejor calidad si la restricción $\sigma^0(\bar{\mathbf{x}}) > 0$ es sustituida por una más restrictiva $\sigma^0(\bar{\mathbf{x}}) > \epsilon$ para todo triángulo de $N(q)$, donde $\epsilon > 0$ es un parámetro decreciente que tiende a cero cuando el número de iteraciones globales crece.

Los nodos son insertados en la curva sin un criterio específico, únicamente teniendo en cuenta su orden creciente de numeración. Esto conduce a situaciones en las que algunas secciones de la curva C no pueden ser interpoladas por las aristas de la malla paramétrica N .

En algunas aplicaciones carecemos de una expresión analítica de la curva que va a ser interpolada. Sólo hay disponible una serie de puntos alineados $\{q_c\}$ que describen un contorno de forma aproximada. Este es el caso, por ejemplo, de los datos proporcionados por mapas digitales que describen líneas de costa, contornos de rugosidad, cauces de ríos, etc. Para abordar esta situación resolvemos una versión discreta de (1). Dada la submalla local $N(q)$, analizamos si q es proyectable en algún punto de $\{q_c\}$, es decir,

comprobamos si la condición $\sigma^0(\mathbf{x}) > \epsilon$ para todo triángulo de $N(q)$ se satisface cuando \mathbf{x} recorre $\{q_c\}$. Entre las posiciones \mathbf{x} que satisfacen la condición anterior elegimos el punto óptimo, $\bar{\mathbf{x}}$, como aquel que minimiza $|K_\eta^{00}|_n$. Tenemos que destacar que este problema sólo está correctamente definido si la densidad de puntos de $\{q_c\}$ es suficientemente alta. Típicamente, la distancia entre puntos contiguos de $\{q_c\}$ debe ser mucho menor que las distancias entre nodos adyacentes de N .

Normalmente, la mayoría de los nodos de N están muy lejos de cualquier punto de $\{q_c\}$ y, por lo tanto, es probable que no sean proyectables. Por ello es conveniente tener un conocimiento previo de qué nodos son candidatos a ser proyectados. Una posibilidad es asociar a cada nodo, tanto de N como de $\{q_c\}$, el cuadrado de una red regular en el que se encuentre dicho nodo. Supongamos que el tamaño de estos cuadrados es $d_{max} \times d_{max}$, siendo d_{max} la arista máxima presente en la malla. Podemos decidir rápidamente si el nodo q es candidato a ser proyectado en $\{q_c\}$ estudiando solamente la región, S_q , formada por el cuadrado que contiene a q y por los cuadrados adyacentes. En primer lugar, tenemos el subconjunto $\{q'_c\}$ de puntos pertenecientes a $\{q_c\}$ e incluidos en S_q . Si $\{q'_c\} \neq \emptyset$, analizamos si q es proyectable en $\{q'_c\}$ como se explicó anteriormente. Hay que tener en cuenta que la distancia entre q y cualquier punto del contorno, fuera de S_q , es mayor que d_{max} y, consecuentemente, está fuera de la región factible de $N(q)$ (la región factible de $N(q)$ está incluida en un círculo de radio d_{max} y centro q).

3. PERFIL VERTICAL DE VIENTO

Consideramos un perfil logarítmico-lineal [7] en la capa límite planetaria (PBL) que tiene en cuenta la interpolación horizontal [1], el efecto de la rugosidad en la velocidad y dirección del viento, y la estabilidad atmosférica (neutra, estable o inestable) según la clasificación de Pasquill. En la capa superficial (SL) se construye un perfil logarítmico de velocidades de viento definido por:

$$u(z) = \frac{u_*}{\kappa} \left[\log\left(\frac{z}{z_0}\right) - \Psi_m\left(\frac{z}{L}\right) \right] \quad z_0 < z \leq z_{sl} \quad (2)$$

donde u es la velocidad del viento, $\kappa = 0,4$ es la constante de von Karman y z es la altura sobre el terreno del punto estudiado. El término u_* representa la velocidad de fricción, la cual se obtiene en cada punto a partir de las medidas interpoladas a la altura de las estaciones (*interpolación horizontal*),

$$u_* = \frac{\kappa u(z_e)}{\log\left(\frac{z_e}{z_0}\right) - \Psi_m(z_e)} \quad (3)$$

Asimismo, z_0 corresponde a la longitud de rugosidad de la zona y z_e a la de la estación. La rugosidad está en función de las características del terreno y una forma de estimarla

es mediante valores estándar para diferentes tipos de terreno [23]. Por último, Ψ_m es una función que depende de la estabilidad del aire [24], la cual es función de la altura z y de la longitud de Monin-Obukhov L .

Aunque este modelo fue desarrollado inicialmente para aplicaciones terrestres, puede considerarse aplicable sobre emplazamientos situados en mar abierto [11]. Sin embargo, su aplicabilidad en zonas costeras, donde el flujo se ve afectado por la proximidad de la tierra, no está tan clara. La razón es que en aguas costeras, cuando el viento sopla en dirección tierra-mar, la línea de costa introduce un fuerte cambio de rugosidad y de transferencia de calor, lo cual conduce a cambios en la homogeneidad en el flujo, limitando así el uso del perfil propuesto. Los parques eólicos *offshore* siempre estarán bajo estas influencias, de ahí la importancia de encontrar un perfil que se adapte a dichas condiciones. A continuación veremos cómo es posible diferenciar los puntos del mar en los cuales no es posible la utilización de (2), los cuales se clasificarán como *offshore*, y en cuales de ellos el flujo es tal que puede aplicarse el perfil terrestre. Seguidamente expondremos cómo será la corrección aplicada al perfil para que se adapte a los cambios que introduce la línea de costa.

3.1. Definición de puntos *offshore*

La gran diferencia de la capacidad calorífica y de conducción existente entre el mar y la tierra conlleva que la temperatura del aire sobre el terreno sea, en general, mayor que la registrada en la superficie del mar. En [8] se sigue la explicación dada por Csanady [12] y Smedman et al. [25] sobre el régimen de flujo que se desarrolla en estas condiciones. Cuando el aire caliente sopla por encima del mar frío, la capa de aire adyacente al mar se refrescará, desarrollándose inmediatamente una estratificación estable. De forma simultánea, los cambios de rugosidad y de flujo de calor introducidos por la línea de costa ocasionan el desarrollo de una capa límite interna sobre dicha línea. En el caso de advección de aire caliente sobre una masa de agua más fría nos encontraremos con una capa límite interna estable (SIBL), la cual se caracteriza por una baja turbulencia. La temperatura del aire cercano al mar irá bajando hasta igualarse con la del mar, que se mantendrá prácticamente constante debido a su gran capacidad calorífica. Cuando ambas temperaturas se igualen, la estabilidad atmosférica a cotas bajas será cercana a la neutra. Por encima de la capa límite interna, la temperatura del aire permanece invariable, es decir, conserva la temperatura que tenía sobre la tierra. Cerca de la parte superior de la SIBL se ha desarrollado un límite de inversión con estratificación estable que separa a las dos regiones. De esta manera, mientras que la estabilidad en la capa de mezcla está cercana a la neutra, la capa estable elevada ejerce su influencia sobre el perfil de velocidad del viento, provocando que el gradiente de velocidad sea mayor que el esperado para una condición ordinaria cercana a la neutra. Este régimen de flujo puede permanecer durante largas distancias, hasta que ya en mar abierto se recupera finalmente la capa límite neutra [11].

Para predecir si en una determinada situación se desarrollará una capa de mezcla con

límite de inversión empleamos el parámetro de flotabilidad Bu . Csanady [12] encontró que para valores de Bu mayores que 30 es probable que el límite de inversión se desarrolle. El cálculo de este parámetro se realiza mediante la siguiente expresión:

$$Bu = \frac{b}{fv_g} = g \frac{\Delta\rho}{\rho} \frac{1}{fv_g} \quad (4)$$

donde f es el parámetro de Coriolis, v_g la velocidad del viento geostrófico, b es la aceleración flotante ($b = g\Delta\rho/\rho$), ρ es la densidad del aire en el nivel geostrófico, $\rho + \Delta\rho$ la densidad del aire entre la superficie y g la aceleración de la gravedad.

Por otra parte, una vez desarrollado el régimen de flujo con capa de mezcla y límite de inversión, es de esperar que su influencia en el perfil de viento esté en función de la altura de inversión. Este parámetro puede calcularse en condiciones de equilibrio mediante la siguiente expresión, propuesta por Csanady [12]:

$$h = A \frac{1}{g} \frac{\rho}{\Delta\rho} u_*^2 \quad (5)$$

donde h es la altura de inversión y A es un parámetro empírico que él estimó en 500.

Las observaciones de [8] han demostrado que una gran altura de inversión tiene poca repercusión sobre el perfil, mientras que una altura de inversión baja ejerce un efecto importante sobre el mismo. Para alturas de inversión del orden de la altura la capa límite no se detectan cambios en el perfil.

Como se subraya en [8], la teoría expuesta sólo puede emplearse en condiciones de equilibrio, cuando la capa de mezcla con límite de inversión ya se ha desarrollado y, por tanto, no es válida para alcances pequeños del viento. Los resultados de [8] condujeron a la conclusión de que el alcance del viento debía ser mayor de 30 *km*. El alcance del viento (*fetch*) se define como la distancia a la costa sobre la cual el viento sopla con una velocidad y dirección aproximadamente uniformes. Así, en nuestro estudio consideramos el *fetch* calculando la distancia entre la costa y cierto punto del mar, medida sobre la dirección en que sopla el viento cuando éste lo hace desde la tierra hacia el mar. En resumen, la corrección del perfil se realizará cuando el parámetro de flotabilidad sea $Bu > 30$ y cuando además el alcance del viento sea mayor que 30 *km* y menor que 100 *km* (a partir de esta distancia consideraremos que nos encontramos sobre mar abierto y ya no habrá influencia de la línea de costa en el perfil [11, 13, 14]). Sólo los puntos que cumplan con estas condiciones serán considerados como emplazamientos *offshore*, el resto, aunque se encuentren sobre el mar, se tratarán como terrestres, aplicándoseles el perfil de viento definido por (2).

3.2. Perfil vertical de viento generalizado

La aplicación del perfil logarítmico-lineal definido por (2) en puntos considerados como *offshore* conduce a errores en la predicción del viento, debido a los efectos explicados an-

teriormente. Una forma simple de corregir este perfil para reducir los errores de predicción consiste en añadir al perfil logarítmico un término lineal que es proporcional a la altura del punto, z , e inversamente proporcional la altura de la capa de inversión, h . El perfil corregido sería el siguiente:

$$u(z) = \frac{u_*}{\kappa} \left[\log\left(\frac{z}{z_0}\right) - \Psi_m\left(\frac{z}{L}\right) + c\frac{z}{h} \right] \quad z_0 < z \leq z_{sl} \quad (6)$$

Los resultados de [8] concluyeron que el valor del factor de corrección c podía fijarse en 4 para ajustarse a los datos y medidas de la zona estudiada. A falta de datos sobre otras zonas, asumiremos este valor de c hasta poder comprobar si es válido o no en otros emplazamientos. Otra conclusión obtenida al comprobar los efectos de la corrección al perfil es que las desviaciones se hacían menores. Como podemos observar, el perfil corregido puede generalizarse tanto para los casos considerados *offshore*, como para los casos terrestres. Basta con hacer $c = 0$ en caso de que nos encontremos en una situación en la que el flujo no se vea alterado por la proximidad de la costa. Así, en los casos que cumplan con las condiciones antes dadas de $Bu > 30$ y alcance del viento mayor que 30 km , emplearemos el perfil dado por (6), tomando $c = 4$, y en el resto de las ocasiones, es decir, en el caso terrestre, en mar abierto y siempre que no se cumplan las condiciones anteriores, haremos uso del perfil dado por (6), pero tomando $c = 0$, lo que equivale a utilizar el perfil dado por (2).

El cálculo de la velocidad de fricción u_* para introducirla en el perfil de viento corregido dado por (6) también se realiza para cada punto a partir de las medidas interpoladas a la altura de las estaciones (*interpolación horizontal*). Sin embargo, la ecuación a emplear es diferente, ya que hay que tener en cuenta el término lineal que se ha añadido. Combinando (5) y (6) obtenemos:

$$u_* = \frac{u(z_e) + \sqrt{u^2(z_e) - 4\frac{cz_e g \Delta \rho}{\kappa^2 A \rho} [\log(\frac{z_e}{z_0}) - \Psi_m(\frac{z_e}{L})]}}{\frac{2}{\kappa} [\log(\frac{z_e}{z_0}) - \Psi_m(\frac{z_e}{L})]} \quad (7)$$

Como puede observarse, si hacemos $c = 0$, es decir, consideramos el caso terrestre o mar abierto, la ecuación (7) coincide con la (3), que nos daba la velocidad de fricción para el perfil de viento sin corregir.

4. EXPERIMENTO NUMÉRICO

Se ha llevado a cabo una simulación numérica en un problema real con el fin de comparar los resultados dados por el perfil usual sin corregir y por el perfil corregido en el noroeste de la isla de Gran Canaria (Canarias, España). El archipiélago canario se encuentra en el Océano Atlántico, al noroeste de África (a unos 115 km), concretamente entre los 13° 23' y 18° 8' de longitud oeste y los 27° 37' y 29° 24' de latitud norte. Esta zona se encuentra

dentro del área de influencia del Anticiclón de Las Azores y de la corriente marina fría de Canarias, elementos que generan los vientos alisios (los de componente NE son los predominantes en las islas) y determinan su clima.

Gran Canaria se encuentra aproximadamente a $27^{\circ} 57'$ N y $15^{\circ} 35'$ O. El dominio escogido para este experimento comprende la mitad sur de la isla, así como una franja de mar de poco más de 100 km en dirección sur y unos 60 km al este, para poder observar las particularidades del perfil *offshore*. Dicho dominio se muestra en la figura 2. La malla tridimensional utilizada de 101904 nodos y 487828 tetraedros se ha adaptado a la orografía del terreno. La figura 1 representa la isla completa, con la dirección predominante del viento y la delimitación que hemos realizado de la zona *offshore*. Para visualizar la zona *offshore* hemos dibujado una poligonal que encierra todos los puntos que se encuentran a una distancia comprendida entre 30 y 100 km de la isla en la dirección del viento. Para determinar si un punto se halla dentro del polígono descrito se ha utilizado el conocido test del rayo.

La simulación se ha llevado a cabo para el día 11 de abril de 2007, tomando como referencia el mapa de viento predicho por el Instituto Nacional de Meteorología (INM) mediante un modelo de escala oceánica (modelo HIRLAM) con 48 horas de antelación. Actualmente se carece de medidas de viento reales en la zona sometida a estudio, sin embargo, mediante este experimento hemos comprobado que la diferencia en la estimación del viento mediante ambos perfiles es significativa. Consideraremos como datos de partida las predicciones de velocidad y dirección del viento del INM. Dichos datos se han utilizado para definir 10 puntos de medida repartidos tanto dentro como fuera de la zona *offshore* (ver figura 1 y cuadro 1).

Es preciso añadir que, en general, los trabajos desarrollados para la descripción del régimen de flujo y de las condiciones *offshore* [8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 25], hacen referencia a emplazamientos caracterizados por masas de agua fría, lo que supone una gran diferencia de temperatura entre el agua y el aire. El desarrollo de un régimen de flujo como el que hemos descrito en latitudes más cálidas, como es el caso de las Islas Canarias, no está contrastado. Sin embargo, como aproximación inicial se ha decidido emplear los mismos valores de los parámetros que definen la corrección *offshore* (distancia mínima y máxima de la costa, constante c , parámetro de flotabilidad Bu), que en los estudios referenciados. En simulaciones futuras, contrastando los valores estimados por el modelo con medidas reales, se podrá comprobar si dichos parámetros son válidos o si, por el contrario, han de modificarse y ajustarse para las condiciones de cada región.

Hemos aplicado el modelo de masa consistente con el perfil sin corregir (2) en todos los puntos, tanto de la isla como del mar, que se encuentran fuera de la zona *offshore*. Por tanto, en los puntos de medida E1, E2, E3, E4, E5 y E6 aplicamos dicho perfil. El perfil obtenido en la vertical sobre un punto representativo definido en la zona *offshore* se puede ver en la figura 3. Asimismo, se ha resuelto el mismo problema con el perfil vertical de

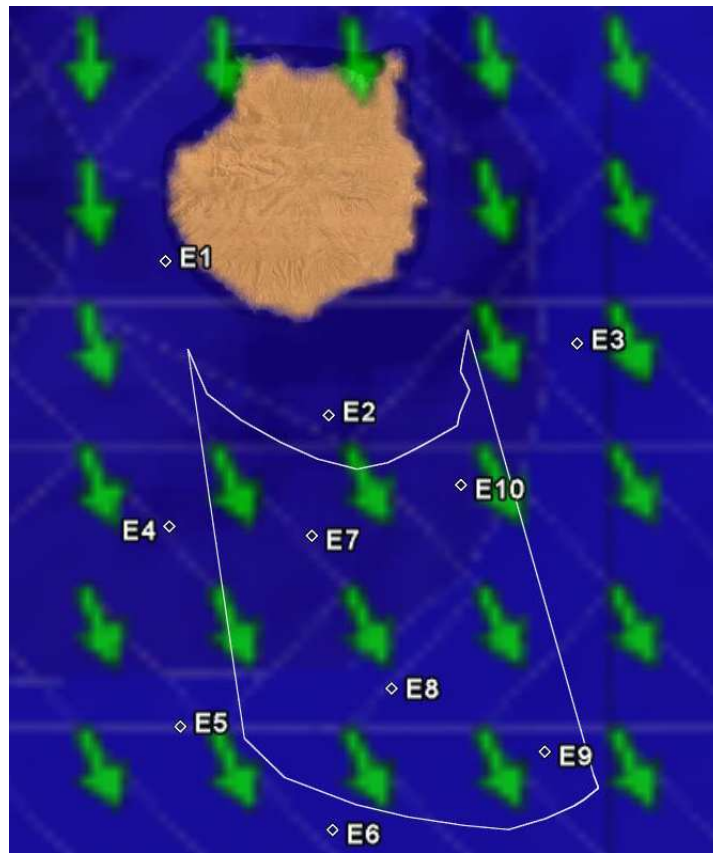
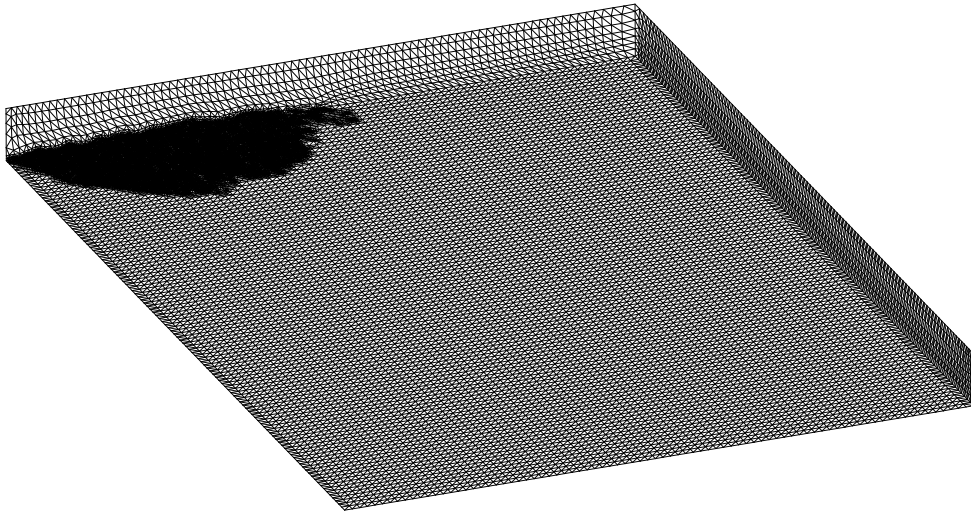


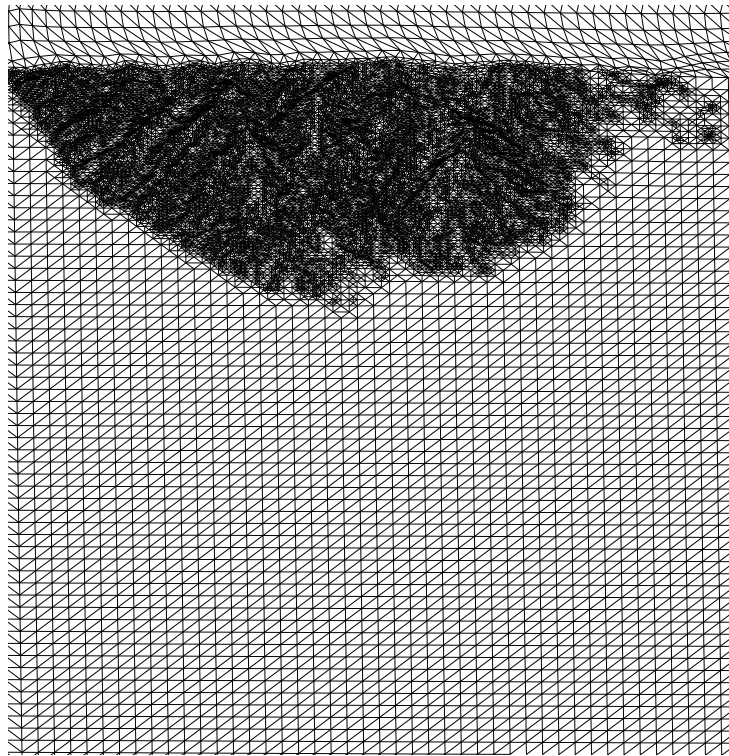
Figura 1: Isla de Gran Canaria, dirección del viento predominante prevista para el día 11 de abril de 2007, delimitación aproximada de la zona *offshore* y puntos de medida.

Punto medida	UTM-E	UTM-N	Velocidad (m/s)	Dirección ($^{\circ}$)
E1	417600.00	3079497.55	3.75	173
E2	446873.62	3051714.53	3.75	154
E3	491606.59	3064424.21	4.25	160
E4	418110.00	3031437.94	3.75	158
E5	419565.90	2996047.63	4.25	155
E6	447259.68	2977404.68	4.25	157
E7	443676.80	3030405.30	3.75	158
E8	457815.52	3002576.39	4.25	154
E9	485138.71	2991305.56	4.25	155
E10	470476.97	3039376.77	3.75	156

Cuadro 1: Coordenadas, velocidad y dirección del viento en los puntos de medida



(a)



(b)

Figura 2: (a) Malla adaptada a la orografía del área de estudio. (b) Detalle de la zona de la isla viento corregido. Para llevar a cabo esta simulación se han introducido en el programa de

viento las condiciones para la determinación de la zona *offshore*. Dicha zona se ha definido mediante una línea poligonal. Los puntos cuya proyección esté dentro de esta poligonal serán los candidatos a ser considerados *offshore*, es decir, susceptibles de corrección en su perfil vertical de viento. Los puntos de medida que cumplen con estas características son E7, E8, E9, y E10. La aplicación de la ecuación (6) en la zona a corregir, da como resultado el perfil mostrado en figura 3 en la vertical del mismo punto del caso anterior. Como podemos observar, la diferencia entre los dos perfiles es considerable en la Capa Superficial. Esto nos lleva a pensar que también para regiones cálidas la corrección del perfil en las zonas *offshore* puede ser importante. Sin embargo, hay que tener en cuenta que el ajuste de los parámetros empleados teniendo en cuenta medidas reales, posiblemente proporcionará resultados más precisos y permitirá ampliar las conclusiones.

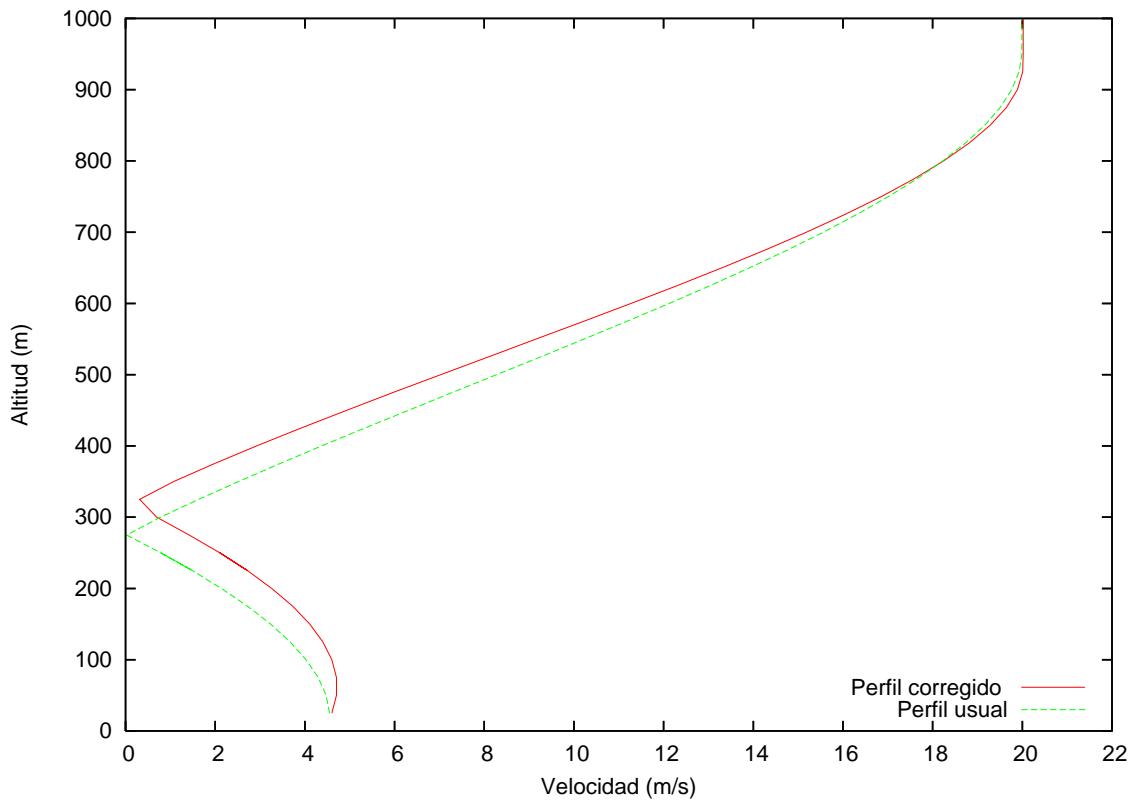


Figura 3: Perfil vertical de viento (a) caso usual terrestre (b) caso *offshore*.

5. CONCLUSIONES

En este trabajo hemos incluido en nuestro modelo de masa consistente una generalización del perfil vertical de viento en la capa superficial con el objetivo de introducir las

peculiaridades asociadas a la zona *offshore*. Esto implica que nuestro modelo se encarga de determinar si un punto se encuentra o no en el mar y, en caso positivo, comprueba si se trata de un caso en el que hay que aplicar el perfil corregido (6) o el perfil usual (2) basándose en las condiciones impuestas para la zona *offshore*.

Los resultados preliminares obtenidos revelan que la diferencia en la estimación del perfil vertical es significativa. Por tanto, dicha corrección, hasta ahora considerada sólo para zonas frías con altos gradientes de temperatura, puede también estar indicada en regiones más cálidas con temperaturas más uniformes.

La utilización de un sistema SODAR (*Sonic Detection And Ranging*) permitirá en el futuro cotrastar los resultados obtenidos con medidas reales y obtener valores más ajustados de los parámetros que intervienen en la delimitación de la zona *offshore* (distancia a la costa o *fetch*, parámetro de flotabilidad Bu , constante c) para la zona estudiada, además de la inclusión de datos de viento reales.

REFERENCIAS

- [1] G. Montero, R. Montenegro y J.M. Escobar, A 3-D diagnostic model for wind field adjustment, *J. Wind Eng. Ind. Aer.*, Vol. **74-76**, pp. 249–261, (1998).
- [2] G. Montero y N. Sanin, Modelling of wind field adjustment using finite differences in a terrain conformal coordinate system, *J. Wind Eng. Ind. Aer.*, Vol. **89**, pp. 471–488, (2001).
- [3] G. Montero, E. Rodríguez, R. Montenegro, J.M. Escobar y J.M. González-Yuste, Genetic algorithms for an improved parameter estimation with local refinement of tetrahedral meshes in a wind model, *Adv. Eng. Soft.*, Vol. **36**, pp. 3–10, (2005).
- [4] J.M. Escobar, E. Rodríguez, R. Montenegro, G. Montero y J.M. González-Yuste, Simultaneous untangling and smoothing of tetrahedral meshes, *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.*, Vol. **192**, pp. 2775–2787, (2003).
- [5] J.M. González-Yuste, R. Montenegro, J.M. Escobar, G. Montero y E. Rodríguez, Local refinement of 3-D triangulations using object-oriented methods, *Adv. Eng. Soft.*, Vol. **35**, pp. 693–702, (2004).
- [6] E. Rodríguez, G. Montero, R. Montenegro, J.M. Escobar y J.M. González-Yuste, A three-dimensional mass consistent wind model using terrain adapted tetrahedral meshes, B.H.V. Topping, G. Montero y R. Montenegro eds., *Proceedings of the Fifth International Conference on Engineering Computational Technology*, Civil-Comp Press, Stirlingshire, United Kingdom (2006), paper 100.
- [7] D.P. Lalas and C.F. Ratto, *Modelling of atmospheric flow fields*, World Scientific Publishing, Singapore, (1996).

- [8] B. Lange, S. Larsen, J. Højstrup and R. Barthelmie, Importance of thermal effects and sea surface roughness for offshore wind resource assessment, *J. Wind Eng. Ind. Aer.*, Vol. **92**, pp. 959–988, (2004).
- [9] B. Lange, S. Larsen, J. Højstrup and R. Barthelmie, The influence of thermal effects on the wind speed profile of the coastal marine boundary layer, *Boundary Layer Meteorol.*, Vol. **112**, pp. 587–617, (2004).
- [10] B. Lange, *Modelling the marine boundary layer for offshore wind power utilisation*, VDI Verlag, Düsseldorf, (2002).
- [11] J.B. Edson and C.W. Fairall, Similarity relationships in the marine atmospheric surface layer for terms in the TKE and scalar variance budgets, *J. Atmos. Sci.*, Vol. **55**, pp. 2311–2328, (1998).
- [12] G.T. Csanady, Equilibrium theory of the planetary boundary layer with an inversion lid, *Boundary Layer Meteorol.*, Vol. **6**, pp. 63–79, (1974).
- [13] B. Källstrand, H. Bergström, J. Højstrup and A.-S. Smedman, Mesoscale wind field modifications over the Baltic Sea, *Boundary Layer Meteorol.*, Vol. **95**, pp. 161–188, (2000).
- [14] H.P. Frank, S.E. Larsen and J. Højstrup, Simulated wind power off-shore using different parameterisations for the sea surface roughness, *Wind Energy 3*, Vol. **2**, pp. 67–79, (2000).
- [15] R. Montenegro, G. Montero, J.M. Escobar, E. Rodríguez y J.M. González- Yuste, Tetrahedral mesh generation for environmental problems over complex terrain, *Lect. Notes Comp. Sci.*, Vol. **2329**, pp. 335–344, (2002).
- [16] R. Montenegro, G. Montero, J.M. Escobar y E. Rodríguez, Efficient strategies for adaptive 3-D mesh generation over complex orography, *Neural Par. Sci. Comp.*, Vol. **10**, pp. 57–76, (2002).
- [17] G. Montero, R. Montenegro, J.M. Escobar y E. Rodríguez, Generación automática de mallas de tetraedros adaptadas a orografías irregulares, *Rev. Int. Mét. Num. Cál. Dis. Ing.*, Vol. **19** (2), pp. 127–144, (2003).
- [18] J.M. Escobar, G. Montero, R. Montenegro y E. Rodríguez, An algebraic method for smoothing surface triangulations on a local parametric space, *Int. J. Numer. Meth. Eng.*, Vol. **66** (4), pp. 740–760, (2006).
- [19] M.C. Rivara, A grid generator based on 4-triangles conforming mesh-refinement algorithms, *Int. J. Num. Meth. Eng.*, Vol. **24**, pp. 1343–1354, (1987).

- [20] L. Ferragut ,R. Montenegro y A. Plaza, Efficient refinement/derefinement algorithm of nested meshes to solve evolution problems, *Comm. Num. Meth. Eng.*, Vol. **10**, pp. 403–412, (1994).
- [21] A. Plaza , R. Montenegro y L. Ferragut, An improved derefinement algorithm of nested meshes, *Adv. Eng. Soft.*, Vol. **27 (1-2)**, pp. 51–57, (1996).
- [22] J.M. Escobar y R. Montenegro, Several aspects of three-dimensional Delaunay triangulation, *Adv. Eng. Soft.*, Vol. **27 (1-2)**, pp. 27–39, (1996).
- [23] G.J. McRae, W.R. Goodin and J.H. Seinfeld, Development of a second generation mathematical model for urban air pollution I. Model formulation, *Atm. Env.*, Vol. **16 (4)**, pp. 679–696, (1982).
- [24] P. Zannetti, *Air pollution modeling*, Comput Mech Publ, Boston, (1990).
- [25] A.S. Smedman, H. Bergström and B. Grisogono Evolution of stable internal boundary layers over a cold sea, *J. Geophys. Res. C: Oceans*, Vol. **102 (1)**, pp. 1091–1099, (1997).