

Trabajo Fin de Máster

***Análisis CFD del efecto cañón en Eco-Ciudad
Valdespartera, su atenuación y efectos en las
características de ventilación interna de
viviendas según su ubicación y orientación en
los edificios.***

Autor/es

Fernando Monserrat Hernández

Director/es

José Antonio Turégano Romero

Facultad / Escuela

EINA

Año

2013

PROYECTO FINAL DE MÁSTER

Análisis CFD del efecto cañón en Eco-Ciudad Valdespartera, su atenuación y efectos en las características de ventilación interna de viviendas según su ubicación y orientación en los edificios.

RESUMEN

El presente proyecto pretende evaluar con una herramienta informática de cálculo y simulación para CFD (Design Builder), si la disposición en la que se encuentran actualmente los edificios del barrio de Valdespartera en Zaragoza es beneficiosa para la ventilación y si existiera alguna mejora tecnológica que pudiera aplicarse a dichos edificios.

INDICE

- 1. Introducción (Oportunidad del estudio y antecedentes sobre el efecto cañón)**
- 2. Características del análisis CFD.**
 - a. Consideraciones sobre el modelo matemático**
 - b. Consideraciones de las parcelas objeto**
 - c. Consideraciones sobre el viento**
 - i. Introducción**
 - ii. Efecto del viento en el confort humano**
 - iii. Datos para el estudio**
- 3. Metodología**
 - a. Bloques de edificios**
 - b. Mallado**
 - c. Parámetros de simulación**
 - i. Introducción**
 - ii. Datos para el estudio**
 - iii. Efecto del viento en el confort humano**
 - d. Metodología Recomendable para futuros trabajos**
 - i. Mallado**
 - ii. Simulación**
- 4. Resultados**
 - a. Para dirección de viento: 293°**
 - b. Para dirección de viento: 315°**
 - c. Para la velocidad más probable (4m/s) y viento a 293°**
 - d. Para la velocidad más probable (4m/s) y viento a 315°**
 - e. Para un viento de orientación coincidente con la orientación de los bloques (285°) y velocidad 10 m/s**
 - f. Ventilación Interna**
 - i. Ventilación Forzada**
 - ii. Ventilación Natural**
 - iii. Ventilación en los Edificios de Valdespartera**
- 5. Conclusiones.**
- 6. Bibliografía.**

1. Introducción (Oportunidad del estudio y antecedentes sobre el efecto cañón)

La circulación de aire y la distribución de temperatura dentro de los cañones urbanos son valores considerables en el consumo de energía en edificios, estudios de dispersión de contaminante, e intercambio de calor y masa entre los edificios y el cañón de aire son por tanto de interés en estudios en el potencial energético de las técnicas de ventilación natural para edificios, confort en los ciudadanos, etc.

Los patrones de flujo que se desarrollan alrededor de los edificios rigen la distribución de presión y, en consecuencia, la distribución de la concentración de contaminantes en un medio ambiente construido. La gran mayoría de los estudios se centran en los procesos físicos en un único cañón de la calle, es decir, la distribución de la concentración se representa como una función de la idealizada característica geométrica de calle de tipo cañón, de la dirección y velocidad del viento

En su origen se planificó la disposición de los edificios de modo que se suavizara el efecto cañón en los espacios comunes en el interior de las parcelas ocupadas por tres bloques, dos paralelos con orientación aproximada E-O y el tercero haciendo barrera por orientación perpendicular a los anteriores.

El presente proyecto pretende evaluar con la herramienta de cálculo para CFD Design Builder si la disposición anterior cubre los objetivos propuestos y si existiera alguna mejora de fácil aplicación.

Por otra parte la ventilación, en particular la nocturna define una de las estrategias básicas para un comportamiento de los edificios en verano. El objetivo al respecto es identificar el impacto que supone la metodología elegida en cuanto a ventilación.

2. Características del análisis CFD.

En el presente apartado se van a enunciar en primer lugar, las consideraciones sobre el modelo matemático utilizado; en segundo lugar, se propondrán los datos e información de las parcelas sobre las que se realizará el análisis y las consideraciones e hipótesis tomadas para la realización de la simulación.

a. Consideraciones sobre el modelo matemático.

El modelo matemático que se utilizará será el k-ε. Es uno de los modelos de turbulencia más comunes, a pesar que simplemente no logra buenos resultados en casos de grandes gradientes de presión adversos. Se trata de un modelo de dos ecuaciones, lo que significa, que incluye dos ecuaciones de transporte adicionales para representar las propiedades turbulentas del flujo.

La primera variable es la energía cinética turbulenta. La segunda variable es en este caso la disipación turbulenta. Esta es la variable que determina la escala de la turbulencia, mientras que la primera variable determina la energía en la turbulencia.

El modelo k-ε ha demostrado ser útil para los flujos de la capa de corte libre con gradientes de presión relativamente pequeños. Del mismo modo, para flujos de la pared interna y limitada, el modelo da buenos resultados solo en los casos en que significa gradientes de presión son pequeños, la precisión se ha demostrado experimentalmente que se reduce para los flujos que contiene grandes gradientes de presión adversos. Uno podría inferir entonces que el modelo k-ε sería una elección apropiada para problemas tales como entrada de aire y compresores.

- Modelo estándar k-ε.

Un modelo tridimensional de flujo ha sido establecido usando el estado de equilibrio incompresible, las ecuaciones de Navier-Stokes junto con la ecuación de continuidad y la ecuación de conservación de los contaminantes.

El modelo de la ecuación de Navier Stokes (RANS) (Kato et al., 2003; Davidson and Olsson, 1998).

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\phi) + \text{div}(\rho\pi\phi) = \text{div}(\Gamma \text{grad}\phi) + S$$

$$\partial_i(\rho U_i) = 0 \quad (1)$$

$$U_i \partial_i(\rho U_j) = \partial_i \{ \mu (\partial_i U_j + \partial_j U_i - \overline{\rho u_i u_j}) \} - \partial_j P \quad (2)$$

$$U_i \partial_i(\rho C) = \partial_i \{ D \partial_i(\rho C) - \overline{\rho c u_i} \} \quad (3)$$

Donde,

$$-\overline{u_i u_j} = \nu_t (\partial_i U_j + \partial_j U_i) - \frac{2}{3} k \delta_{ij} \quad (4)$$

$$-\overline{cu_i} = (\nu_t / \sigma_c) \partial_i C \quad (5)$$

$-\overline{u_i u_j}$ y $-\overline{cu_i}$ son las tensiones de Reynolds y de flujos contaminantes, respectivamente; ν es la viscosidad laminar; D es la difusividad laminar; ν_t es la viscosidad turbulenta, k es la energía cinética turbulenta; σ_c es el numero de Schmidt turbulento.

Las ecuaciones (1) (2) y (3) tienen la forma general de las ecuaciones de conservación/ transporte, con similares ecuaciones para los modelos de turbulencia.

$$\partial_i (\rho U_i \Phi) - \partial_i (\rho \Gamma_\phi \partial_i \Phi) = S_\phi \quad (6)$$

El modelo de turbulencia k-ε estándar esta resumido en la Tabla 1.

Equation	Φ	Γ_ϕ	S_ϕ
Turb. Kin.	k	$\nu + \nu_t / \sigma_k$	$\rho(G - \varepsilon)$
Energy			
Dissipation Rate	ε	$\nu + \nu_t / \sigma_\varepsilon$	$\rho(k / \varepsilon)(C_{\varepsilon 1} G - C_{\varepsilon 2} \varepsilon)$
$G = \nu_t (\partial_k U_i + \partial_i U_k) \partial_k U_i; \nu_t = C_\mu k^2 / \varepsilon$ $(\sigma_k, \sigma_\varepsilon, C_{\varepsilon 1}, C_{\varepsilon 2}, C_\mu) = (1.0, 1.314, 1.44, 1.92, 0.09)$			

Tabla 1. Resumen del modelo de turbulencia k-ε estándar

A pesar de éste inconveniente físico, el modelo k-ε estándar de turbulencia es de lejos el modelo de viscosidad turbulenta más utilizado de dos ecuaciones en modelos numéricos de dispersión de los contaminantes del aire en un cañón de calles. Sabiendo que en una configuración compleja de cañones de calles, el área de significativa importancia para la salud pública está localizada cerca de una frontera, es decir, el pavimento, el supuesto que ε no requiere condiciones adicionales cerca de los muros provoca un problema significativo.

Este modelo de turbulencia se comparo con el modelo k-ε de turbulencia del grupo de re-normalización (RNGKE) en un cañón real en la calle, Hope Street en Glasgow (Mumovic and Crowther, 2002). Fue demostrado que el modelo RNGKE se comporta mejor que el estándar k-ε, por lo tanto es de esperar que, en el caso de configuraciones más complejas, esta diferencia será igualmente importante.

Sin embargo, la preocupación ha de ser expresada por la exactitud de éste modelo cuando el número de Reynolds es relativamente baja. El modelo se resume en la Tabla 2.

Equation	Φ	Γ_Φ	S_Φ
<i>Turb. Kin. Energy</i>	k	$\nu + \nu_t / \sigma_k$	$\rho(G - \varepsilon)$
<i>Dissipation Rate</i>	ε	$\nu + \nu_t / \sigma_\varepsilon$	$\rho(k / \varepsilon)(C_{\varepsilon 1}G - C_{\varepsilon 2}\varepsilon - \alpha\varepsilon)$
$G = \nu_t (\partial_k U_i + \partial_i U_k) \partial_k U_i; \nu_t = C_\mu k^2 / \varepsilon$ $\alpha = C_\mu \eta^3 (1 - \eta / \eta_0) / (1 + \beta \eta^3); \eta = Sk / \varepsilon$ $S = \sqrt{2S_{ij}S_{ij}}; S_{ij} = 0.5(\partial_j U_i + \partial_i U_j)$ $(\sigma_k, \sigma_\varepsilon, C_{\varepsilon 1}, C_{\varepsilon 2}, C_\mu, \eta_0, \beta) = (0.7194, 0.7194, 1.42, 1.68, 0.0845, 4.38, 0.012)$			

Tabla 2. Resumen del modelo de turbulencia k-ε RNG.

Esta modificación de Chen-Kim del modelo k-ε ha sido seleccionada para analizar debido a su éxito de una serie de cálculos de flujos separados (Stevanovic, 2001). El termino ε de producción se divide en dos partes, la primera de las cuales es la misma que para el modelo estándar pero con un coeficiente multiplicador más pequeño, y la segunda, permite al índice de distorsión de turbulencia '(G/ε) ejercer una influencia en el índice de producción de ε. El modelo se resume en la Tabla 3.

Equation	Φ	Γ_Φ	S_Φ
<i>Turb. Kin. Energy</i>	k	$\nu + \nu_t / \sigma_k$	$\rho(G - \varepsilon)$
<i>Dissipation Rate</i>	ε	$\nu + \nu_t / \sigma_\varepsilon$	$\rho(k / \varepsilon)(C_{\varepsilon 1}G - C_{\varepsilon 2}\varepsilon) + \rho C_{\varepsilon 3} f_1 G^2 / k$
$G = \nu_t (\partial_k U_i + \partial_i U_k) \partial_k U_i; \nu_t = C_\mu k^2 / \varepsilon; f_1 = 1 + (0.05 / f_\mu)^3$ $f_\mu = [1 - \exp(0.0165 \text{Re}_k)]^2 (1 + 20.5 / \text{Re}_t); \text{Re}_k = \sqrt{k} y_N / \nu; \text{Re}_t = k^2 / \varepsilon \nu$ y_N - distance to the nearest wall $(\sigma_k, \sigma_\varepsilon, C_{\varepsilon 1}, C_{\varepsilon 2}, C_{\varepsilon 3}, C_\mu) = (0.75, 1.15, 1.15, 1.9, 0.25, 0.09)$			

Tabla 3. Resumen de la modificación de Chen-Kim del modelo de turbulencia k-ε.

El modelo k-ε (TSKE) de dos escalas ha sido elegido por su capacidad de modelar el proceso de cascada de la energía cinética turbulenta, y para resolver los detalles más complejos, tales como la separación y unión del flujo, que es uno de los principales problemas de el caso de una configuración compleja de cañones de calles. El modelo se resume en la Tabla 4.

Equation	Φ	Γ_Φ	S_Φ
Turb. Kin. Energy in production range	k_p	$\nu + \nu_t / \sigma_{kp}$	$\rho(G - \varepsilon_p)$
Turb. Kin. Energy in dissipation range	k_T	$\nu + \nu_t / \sigma_{kT}$	$\rho(\varepsilon_p - \varepsilon)$
Transfer Rate in production range	ε_p	$\nu + \nu_t / \sigma_{\varepsilon p}$	$\rho(C_{p1}G \frac{G}{k_p} + C_{p2}G \frac{\varepsilon_p}{k_p} - C_{p3}\varepsilon_p \frac{\varepsilon_p}{k_p})$
Dissipation Rate in dissipation range	ε	$\nu + \nu_t / \sigma_\varepsilon$	$\rho(C_{T1}\varepsilon_p \frac{\varepsilon_p}{k_T} + C_{T2}\varepsilon_p \frac{\varepsilon}{k_T} - C_{T3}\varepsilon \frac{\varepsilon}{k_T})$
$G = \nu_t (\partial_k U_i + \partial_i U_k) \partial_k U_i; k = k_p + k_T$ $\nu_t = C_\mu k^2 / \varepsilon_p = C_\mu k^2 / \varepsilon$ $(\sigma_{kp}, \sigma_{\varepsilon p}, C_{p1}, C_{p2}, C_{p3}, C_\mu) = (0.75, 1.15, 0.21, 1.24, 1.84, 0.009)$ $(\sigma_{kT}, \sigma_\varepsilon, C_{T1}, C_{T2}, C_{T3}) = (0.75, 1.15, 0.29, 1.28, 1.66)$			

Tabla 4. Resumen del modelo de turbulencia k-ε de dos escalas.

Teniendo en cuenta que las resoluciones espaciales son diferentes en las mediciones del cañón de calles, en las mediciones en el túnel de viento y en los dominios de cálculo de los modelos CFD, algunas discrepancias entre los resultados numéricos y experimentales se pueden esperar. Esa es la razón principal para la evaluación y desarrollo de los modelos CFD complejos con ambos datos, en el túnel de viento y mediciones en el campo.

b. Consideraciones sobre las parcelas objeto.

En esta parte del estudio se van a tomar las parcelas 46, 47, 50 y 51, situadas en el cruce de calles “El paciente inglés” y “Titanic” en el barrio de Valdespartera, en la ciudad de Zaragoza (España).

Como fuente de las dimensiones de las parcelas se han utilizado planos de la parcela 47 ya que son las mismas dimensiones de área prácticamente para todas ellas; y más adelante y gracias a la herramienta del catastro (del ministerio de economía y hacienda) se han tomado las distancias entre parcelas y calles.

La orientación de los Edificios respecto al Norte es de 75°.

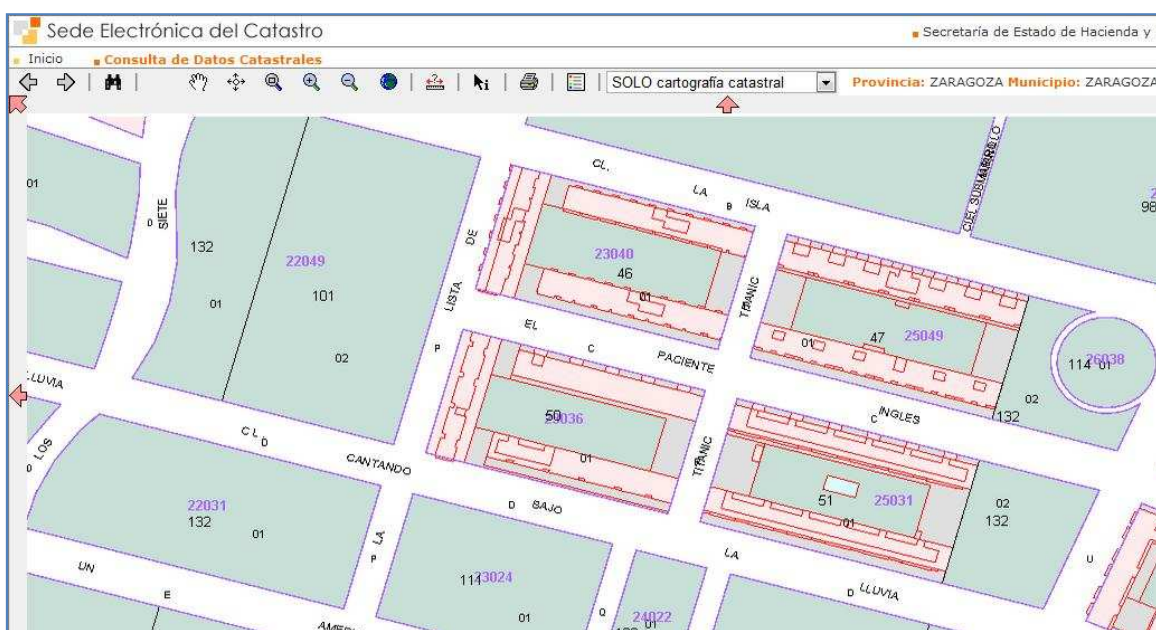


Imagen 1. Parcelas 46, 47, 50 y 51 de Valdespartera, Zaragoza. Fuente: Sede Electrónica del Catastro.

c. Consideraciones sobre el viento.

i. Introducción

El aire como envoltura gaseosa de la tierra constituye una delgada capa fluida y turbulenta removiéndose con intensidad variable debida a grandes contrastes térmicos. Cuando el aire se desplaza masivamente en grandes proporciones se le llama viento.

A la ausencia de viento cerca del suelo o de la superficie a estudiar se le conoce como Calma. Es poco frecuente que esta quietud se observe a todas las alturas sobre un mismo lugar y podemos considerarla inexistente si alcanzamos varios miles de metros.

Existen tablas que ordenan el viento en función de su fuerza, la referencia tomada en este estudio es la de Beaufort.

La Escala de Beaufort ordena los vientos según su fuerza medidos a 10 m de altura y en campo abierto.

Escala de Beaufort	Nombre de Viento	Velocidad		Efectos en la tierra
		m/s	km/h	
0	Calma	0,5	2	El humo asciende sin perturbaciones
1	Aire ligero	1,5	5	El humo se desplaza perceptiblemente con el viento
2	Brisa ligera	3	11	Se mueven las hojas de los arboles
3	Brisa suave	6	22	Se agitan las hojas, ondulan las banderas
4	Brisa moderada	8	30	Se levanta polvo y papeles, agitan las copas de arboles
5	Brisa fresca	11	40	Pequeños movimientos de arboles, superficie de lagos ondulada
6	Brisa fuerte	14	50	Se mueven las ramas de los arboles
7	Viento moderado	17	60	Se mueven los arboles grandes, dificultad para caminar
8	Viento fresco	21	75	Se quiebran las copas de los arboles
9	Viento fuerte	24	87	Daños en arboles, imposible caminar contra el viento
10	Gran viento	28	100	Árboles arrancados
11	Tempestad	32	115	Estragos abundantes en construcciones y arboles
12	Huracán	36+	130+	Destrucción casi total de edificios

Tabla 5. Escala de Beaufort (Manual técnico de Ventilación - Soler & Palau - www.solerpalau.es)

ii. Efecto del viento en el confort humano

El viento comienza a ser ya perceptible a 0,08 m/s por el cuerpo humano.

Si se diera el caso de un local ocupado por personas, en reposo o activas en una actividad ligera y con una temperatura entre 20 y 24 °C, una intrusión de aire a una velocidad comprendida de 0,5 a 1 m/s les proporciona una sensación confortable de frescor, pero si se trata de personas dedicadas a una actividad con gran esfuerzo muscular, esta sensación de alivio no se producirá hasta que se alcance una velocidad de aire mayor por ejemplo de 1,3 a 2,5 m/s. Sobrepasar esta velocidad provoca más bien una sensación molesta que de alivio y por tanto debe evitarse.

Entre estos extremos indicados existe una escala de sensaciones diversas en función del caso. No obstante, se debe de tener siempre en cuenta la influencia de la temperatura del aire, que debe ser inferior a la del cuerpo y también que el grado de humedad sea suficientemente bajo para permitir la evaporación del sudor humano. Esta tabla recogida del manual técnico de ventilación de Soler y Palau, indica cómo se reduce la sensación térmica en función de la velocidad del viento sobre las personas.

Velocidad del aire sobre personas	Sensación de que la temperatura ambiente se ha rebajado en
0,1 m/s	0° C
0,3 m/s	1° C
0,7 m/s	2° C
1 m/s	3° C
1,6 m/s	4° C
2,2 m/s	5° C
3 m/s	6° C
4,5 m/s	7° C
6,5 m/s	8° C

Tabla 6. Efecto sobre el cuerpo humano (Manual técnico de Ventilación - Soler & Palau - www.solerpalau.es)

En la siguiente tabla se muestra muy claramente el efecto que tiene lugar en las personas la velocidad del viento.

Velocidad (m/s)	Sensación de que la temperatura ambiente se ha rebajado en
Hasta 0,25	Imperceptible
0,25 a 0,5	Comienza apenas a sentirse
0,5 a 1,0	Movimiento suave, efectivo y agradable en condiciones cálido- húmedas
1,0 a 1,65	Movimiento moderado sin llegar a causar efectos desagradables
1,65 a 3,3	Puede llegar a ser desagradable (papeles se vuelan) 3,3 m/s limite en espacios interiores
3,3 a 5,0	Brisa, agradable en espacios exteriores con condiciones cálidas
5,0 a 10,0	Viento moderado

10,0 a 15,0	Viento fuerte a muy fuerte
Más de 15,0	Vendaval, puede llegar a presentar daños en edificios comunes

Tabla 7. Sensación térmica del viento (Manual Fernando Tudela – Ecodiseño – www.ecodiseño.org)

iii. Datos para el estudio

Se han consultado los datos de viento del mapa de vientos del CENER (<http://www.cener.com/es/energia-eolica/mapas-viento.asp>). Se obtuvo la siguiente roseta de frecuencias y de velocidades.



Imagen 2. Rosa de velocidades y de frecuencias (CENER)

El viento más frecuente e intenso llega proveniente del Noroeste desde 292,5° a 315°.

Con velocidades no mayores a 4 m/s, no obstante en la siguiente gráfica adjunta, se ve que aunque en la roseta no se vea reflejado, existen otras velocidades de viento menos frecuentes, cuyos máximos se han utilizado para realizar esta simulación.

En este caso 10 m/s.

Dada la variabilidad en la frecuencia de vientos de 292,5° a 315° se ha decidido realizar la simulación con esas dos hipótesis de viento. De esta forma, se podrá comprobar si afecta o no la dirección del viento en ese rango sobre la ventilación de los correspondientes bloques.



Imagen 3. Histograma de velocidades de viento (CENER)

3. Metodología

a. Bloques de edificios

Tras importar a design builder un plano de la base superficial de los edificios. Los bloques de edificios se dibujan sobre el plano importado. Tomando alturas de 21 metros para los edificios laterales y 23 para los edificios barrera.

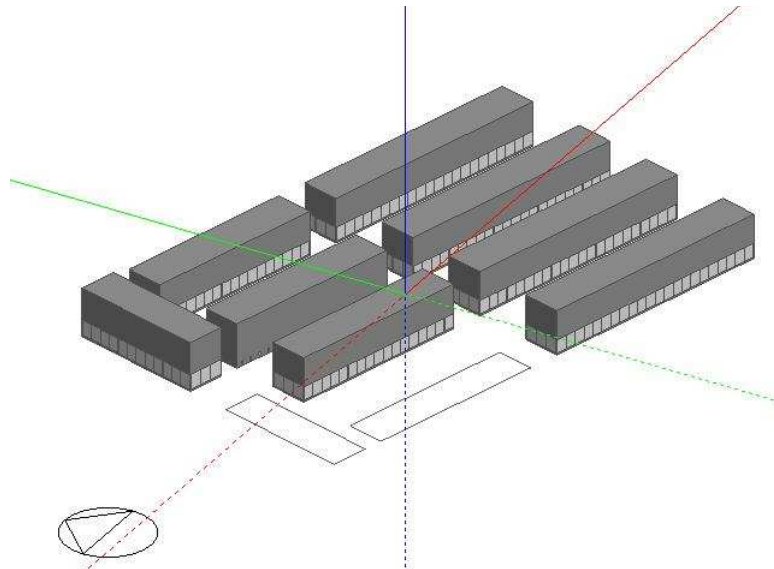


Imagen 4. Disposición de los bloques en Design Builder

b. Mallado

Una vez contruidos los bloques sobre el plano importado, se procede a la realización mallado. El mallado es la base de la simulación, ya que en cada vértice de la malla se resolverá una ecuación del modelo por tanto se deberá realizar correctamente el mallado para que los resultados sean adecuados y validos.

En la siguiente imagen se observa una hoja de resultados con un mallado inadecuado. Se nota como esta despegada la línea de presión del edificio.

Por tanto la malla será lo suficientemente fina como para evitar estos resultados.

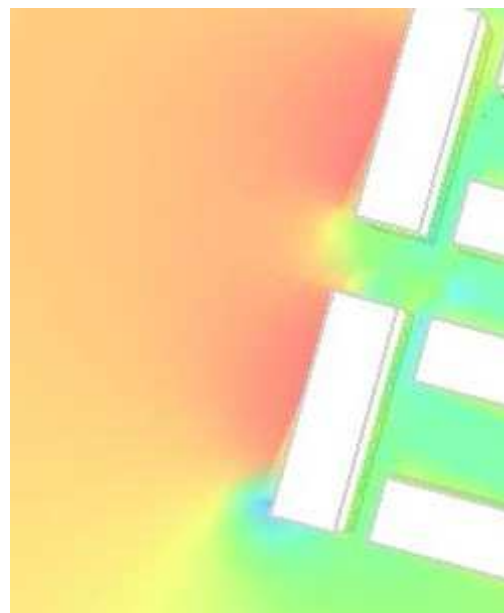


Imagen 5. Problemas de un mal mallado

del
k-e,

A continuación se muestra una imagen de un mallado que sería adecuado.

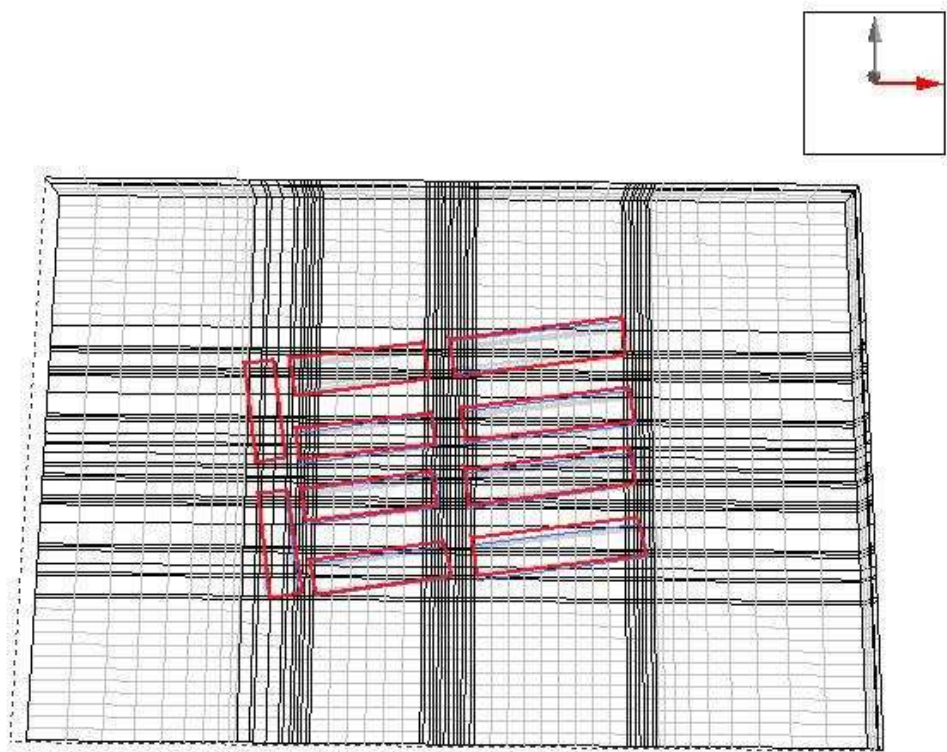


Imagen 6. Mallado sobre los bloques de Valdespartera

Se ha utilizado para las partes más alejadas del edificio un mallado creciente porque no reside mucha importancia el calcular ecuaciones de forma concentrada en puntos alejados de los bloques. Se ha afinado la malla proporcionalmente a la cercanía con puntos clave de los bloques, como son las aberturas entre los bloques y las partes frontales y traseras de los edificios, aquí se ha utilizado un mallado uniforme con 1 metro de separación.

En las partes laterales de los bloques se han utilizado mallas menos finas que en los puntos clave ya comentados.

c. Parámetros de simulación

Una vez realizado el mallado sobre el espacio de trabajo, se procede a realizar la simulación CFD, aquí cobra importancia la hipótesis que fijemos en la interfaz de datos que propone Design Builder. Se han fijado las siguientes hipótesis. Lo más importante es fijar el modelo que como ya se ha dicho, será el K-e.

Después, en función de las iteraciones que se quieran hacer, o en otras palabras, la calidad de la simulación (menos errores) que se desee, se elegirán más o menos iteraciones. En este estudio se han llevado a cabo alrededor de 2000 iteraciones por lo que se han obtenido resultados de un error menor de 10^{-3} residuos normalizados. También es importante fijar que variables se quieren estudiar, en este caso la velocidad en los tres ejes y la presión.

Las gráficas de desarrollo de las iteraciones de la simulación se pueden observar en la siguiente figura.

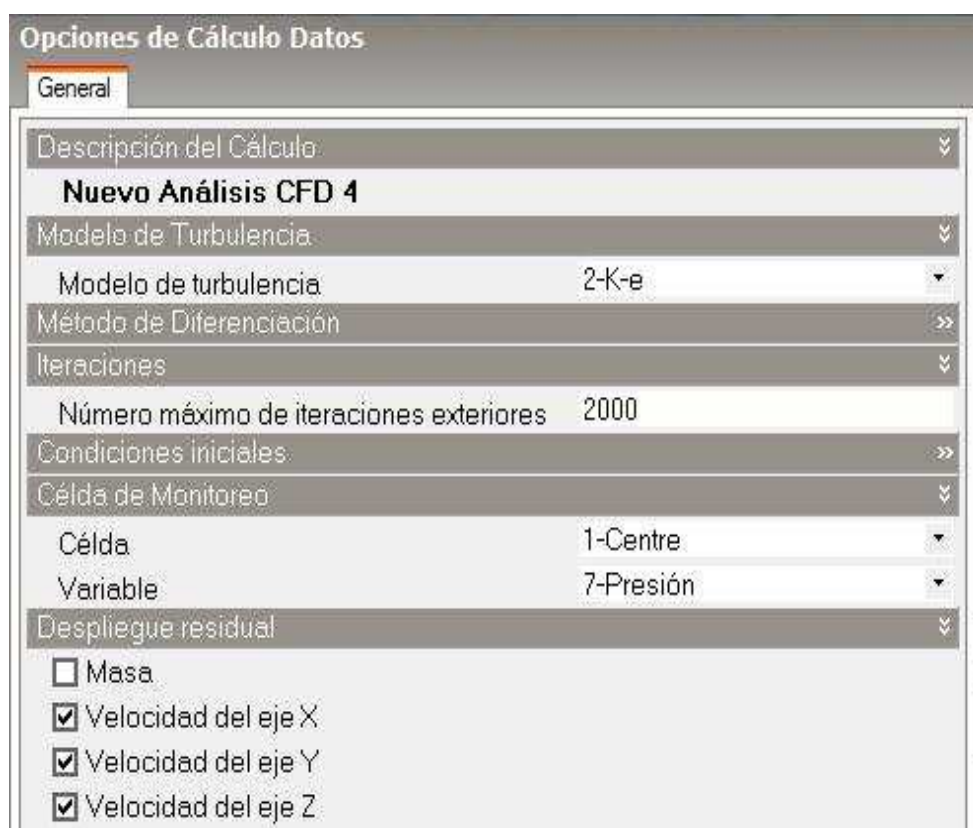


Imagen 7. Hipótesis de la simulación en Design Builder

En la siguiente imagen se muestra el progreso que lleva la simulación con el modelo k-e, donde la gráfica de arriba muestra la evolución de los errores o residuos normalizados que tienen lugar en el modelo para cada una de las iteraciones en las variables. En el caso del

estudio, se han tomado valores por debajo de 10^{-3} por tanto se puede interrumpir la simulación cuando se han alcanzado valores de error tan bajos como estos.

En la gráfica de debajo se muestra la evolución de las iteraciones con la presión, que es la variable independiente del modelo.

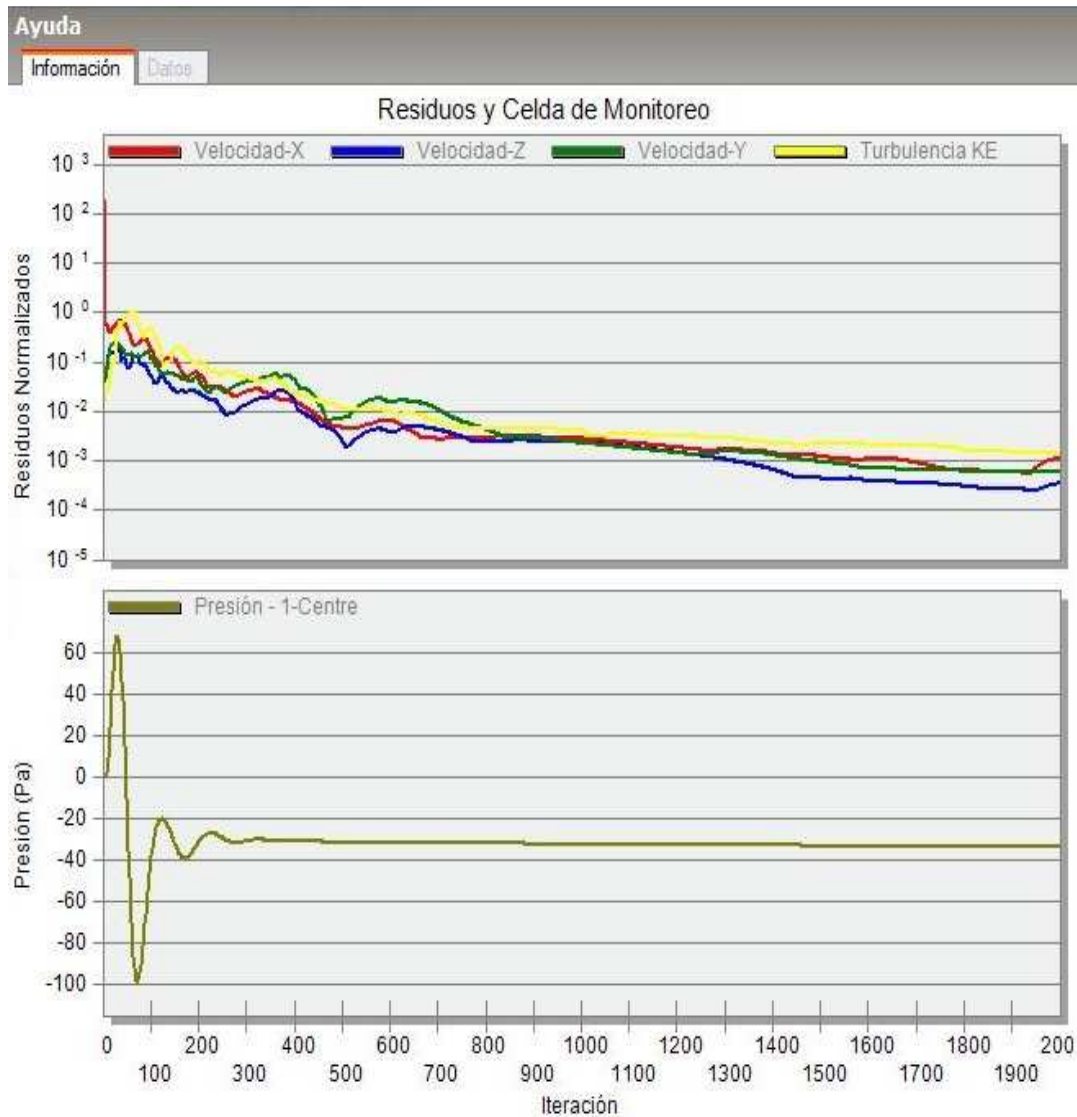


Imagen 8. Gráfica del progreso de la simulación

Tras haber realizado esta operación se procede a la visualización de los resultados con planos de corte, de esta forma se pueden observar la influencia del viento en la velocidad y en la presión.

d. Metodología Recomendable para futuros trabajos

Tras explicar la metodología CFD para el caso de las parcelas del campo de estudio en Valdespartera, se va a proceder a realizar, en este apartado, una metodología que puedan utilizar futuros trabajos de simulación en CFD con Design Builder.

Aunque las características de la metodología a emplear varía en función de las necesidades del trabajo en cuanto a calidad de los resultados, o de otra forma el numero de residuos normalizados de la simulación, se va a proceder a formular una metodología para unos requisitos normales en cuanto a esta calidad de resultados, es decir unos resultados de exigencia media.

i. Mallado

El mallado como ya se ha explicado en el apartado 3 b) es una parte importante del análisis CFD porque establecerá el numero de ecuaciones a resolver en cada uno de los vértices de este y por tanto la calidad de los resultados variaran en función de lo fina que sea la malla.

Un correcto uso del mallado sería utilizar mallas más finas en aquellos espacios donde se centra el campo del estudio objeto de la simulación, o aquellos puntos que se puedan estimar un comportamiento atípico del viento.

De esta forma, se dejarían partes que no influyen tanto en el estudio con un mallado menos fino.

Con esta metodología se consigue una simulación más eficiente en cuanto a tiempo de resolución ya que el sistema no resuelve más ecuaciones de las necesarias para el estudio; esto es muy importante dado que si las características del ordenador o el hardware desde donde se ejecuta Design Builder no son muy buenas, con un mallado realizado de forma eficiente se podría llegar a aprovechar mejor esas características del ordenador y lanzar la simulación exitosamente.

Cuando se comienza a editar un mallado, uno ya se encuentra con un mallado creado por defecto, este mallado no es ni mucho menos el más indicado para realizar la simulación. En la siguiente imagen se observa un mallado asignado por defecto.

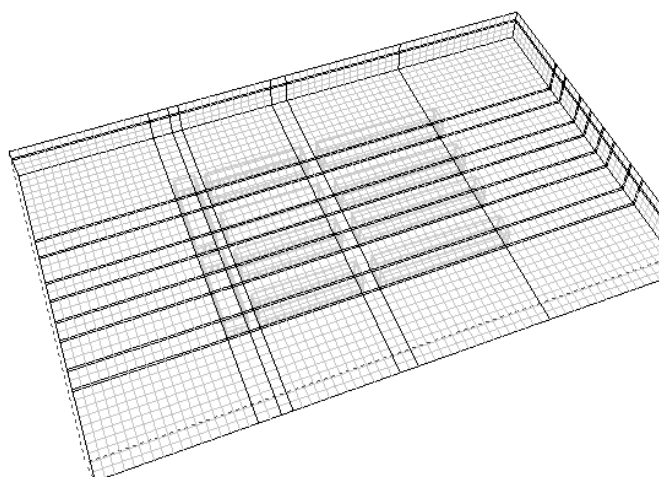


Imagen 9. Mallado por defecto

Las características de un ejemplo con unas exigencias medias sería el siguiente.

Eje X o Y (Planta del edificio de estudio): Para el mallado que rodea el campo de estudio se utilizara el mallado decreciente o creciente. Para un modelo de exigencias medias se utilizaran en la característica del mallado zonal:

Tipo de Espaciamiento: Ley de Incremento de potencia o Ley de Decremento de Potencia.

Potencia de espaciamiento: 2,00

Número de Divisiones: 15

Con estas características, el mallado quedaría tal que:

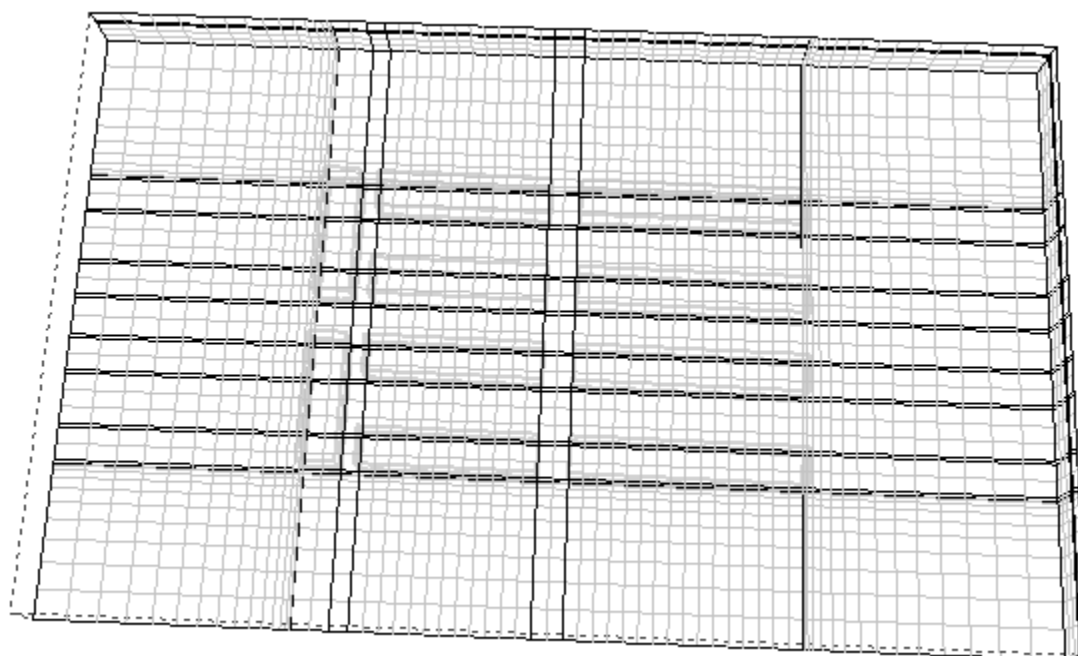


Imagen 10. Mallado eficiente XY entorno

Para que la simulación muestre resultados en los puntos conflictivos o donde se esperan resultados atípicos de viento, se deberá afinar la malla con las siguientes características, correspondientes a un modelo de exigencias medias:

Tipo de Espaciamiento: Uniforme.

Dimensión de Espaciamiento (m): 3,00

En la siguiente imagen se observa como quedaría un mallado realizado de forma eficiente en planta:

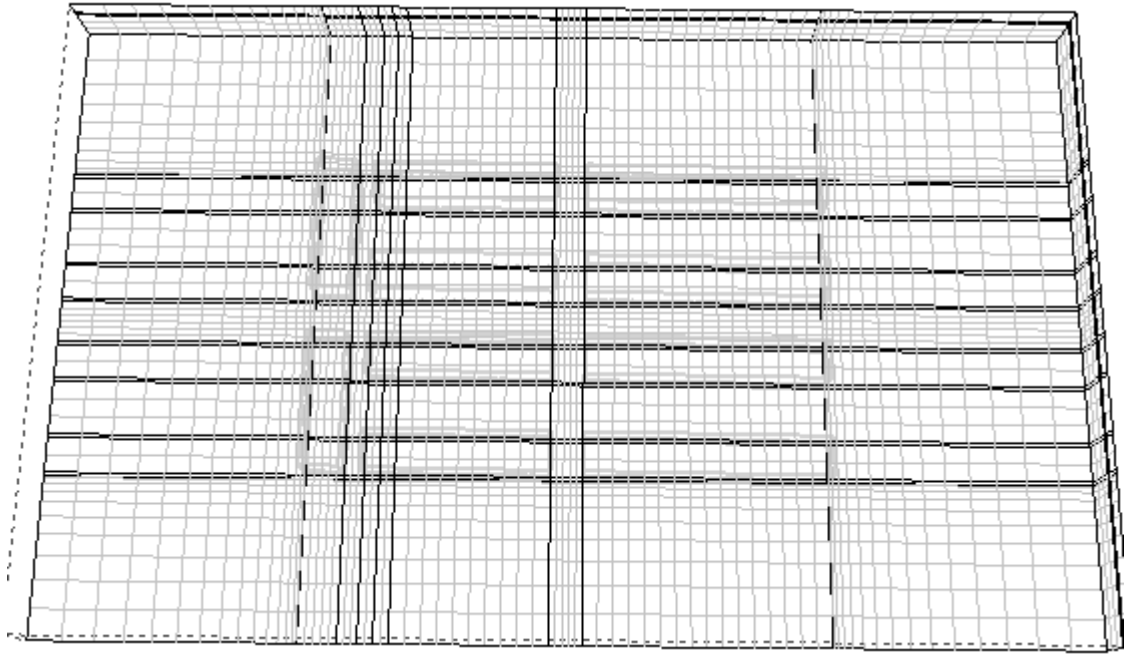


Imagen 11. Mallado eficiente XY

Para editar un mallado eficiente en el caso de mallado en el eje Z o en el que represente la altura del edificio sobre el espacio, se han tomado estas características para un modelo de exigencias medias:

Tipo de Espaciamiento: Uniforme.

Dimensión de Espaciamiento (m): 3,00

En la siguiente imagen se observa como quedaría el mallado final:

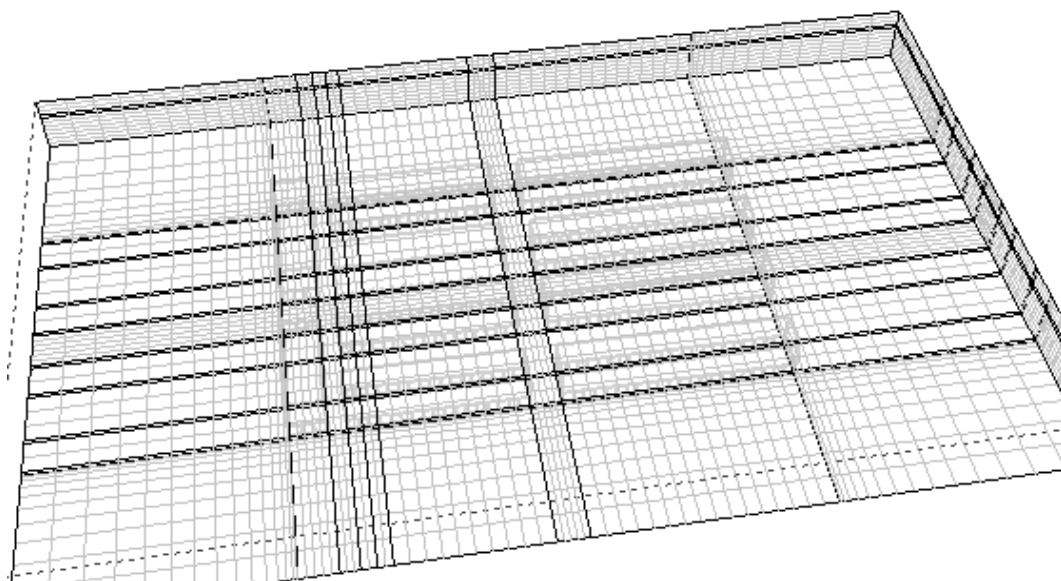


Imagen 12. Mallado eficiente XYZ

En el caso de que el edificio de estudio sea muy alto, el mallado se debería espaciar un poco más siempre y cuando no afecte al objetivo del estudio.

ii. Simulación

Una vez realizado el mallado de forma óptima según los intereses del estudio, se procede a realizar la simulación, como ya se ha comentado en los apartados anteriores. Las simulaciones tardan en realizarse, ya que depende de las propiedades del ordenador que se utilice y en función del mallado que se haya definido. Al haber realizado el mallado de forma eficiente se ahorraría tiempo de simulación.

La característica de la simulación en Design Builder dependerá de los requerimientos del estudio.

En la siguiente imagen se observan algunas de las características que Design Builder pregunta al usuario para realizar la simulación:

Descripción del Cálculo	
Nuevo Análisis CFD 8	
Modelo de Turbulencia	
Modelo de turbulencia	2-K-e
Método de Diferenciación	1-Velocidad efectiva constante
Iteraciones	2-K-e
Condiciones iniciales	>>
Célula de Monitoreo	>>
Despliegue residual	>>
Controles de Variable Dependiente	>>

Imagen 13. Modelo de turbulencia

El modelo de turbulencia establecerá el método por el cual se va a simular, se pueden elegir dos, el método de viscosidad efectiva constante (en el programa se llama Velocidad efectiva constante), en el cual se tendrán que asignar valores de viscosidad o el modelo K-e por medio del modelo desarrollado anteriormente en el apartado 2 a). En algunas ocasiones utilizar el modelo K-e puede ser un problema. Particularmente cuando hay envueltos flujos de aire de velocidades muy bajas donde su difusión está dominada por la convección y esto puede causar que las velocidades fluctúen de forma diferente al valor medio. En estos casos se puede considerar el modelo de turbulencia de viscosidad efectiva constante con un multiplicador de viscosidad alto pero con este modelo será imposible modelar el transporte de turbulencia.

Descripción del Cálculo		⌵
Nuevo Análisis CFD 8		
Modelo de Turbulencia		>>
Método de Diferenciación		⌵
Método de diferenciación	1-Contra el viento	
Iteraciones	1-Contra el viento	
Condiciones iniciales	2-Híbrido	
Celda de Monitoreo	3-Ley de poder	
Despliegue residual		>>
Controles de Variable Dependiente		>>

Imagen 14. Método de Diferenciación

La siguiente característica es el Método de Diferenciación donde se establecen tres métodos:

Contra el Viento: El proceso de cálculo consiste en reemplazar el conjunto de las ecuaciones diferenciales parciales con un conjunto de ecuaciones de diferencias finitas. El enfoque convencional para esto es utilizar la serie de Taylor.

Híbrido: Es un método mas computacionalmente complicado (mas requerimientos de memoria para el ordenador) que el método anterior, pero se reduce la difusión numérica a valores altos del número Pi.

Ley de Poder: El método de ley de poder es sin duda más preciso que el sistema híbrido pero es mucho más costoso computacionalmente.

Por tanto para un estudio de una simulación CFD externa en condiciones de exigencias normales, se utilizará el método ***Contra el Viento***.

Modelo de Turbulencia		>>
Método de Diferenciación		>>
Iteraciones		⌵
Número máximo de iteraciones exteriores	1500	
Condiciones iniciales		>>
Celda de Monitoreo		>>
Despliegue residual		>>
Controles de Variable Dependiente		>>

Imagen 15. Iteraciones

El número de iteraciones exteriores se puede modificar una vez acabadas las iteraciones prefijadas, el valor se incrementará si tras la simulación se han obtenido resultados de errores altos (residuos normalizados de más de 10^{-3}). Para comenzar en un caso de exigencias normales se partirá con un número de 1.500 iteraciones exteriores.

Modelo de Turbulencia	>>
Método de Diferenciación	>>
Iteraciones	>>
Condiciones iniciales	∨
Velocidad inicial a lo largo del eje X (m/s)	0
Velocidad inicial a lo largo del eje Y (m/s)	0
Velocidad inicial a lo largo del eje Z (m/s)	0
Celda de Monitoreo	>>
Despliegue residual	>>
Controles de Variable Dependiente	>>

Imagen 16. Condiciones iniciales

Las condiciones iniciales, en caso de que no se requieran en el caso de estudio, se mantendrán a 0m/s para un caso de exigencias normales.

Modelo de Turbulencia	>>
Método de Diferenciación	>>
Iteraciones	>>
Condiciones iniciales	>>
Celda de Monitoreo	∨
Celda	1-Centre
Variable	7-Presión
Despliegue residual	∨
<input type="checkbox"/> Masa <input checked="" type="checkbox"/> Velocidad del eje X <input checked="" type="checkbox"/> Velocidad del eje Y <input checked="" type="checkbox"/> Velocidad del eje Z <input checked="" type="checkbox"/> Turbulencia KE <input type="checkbox"/> Tasa de Disipación de la Turbulencia KE <input type="checkbox"/> Presión <input type="checkbox"/> Viscosidad	
Controles de Variable Dependiente	>>

Imagen 17. Celda de Monitoreo – Despliegue residual

En la celda de monitoreo se establecen las variables que se quieren que se muestren en la gráfica de monitoreo, no influye en los resultados pero sirve para analizar el comportamiento de la simulación mientras su ejecución.

En la opción de despliegue residual se manifiestan las variables que se mostraran en la grafica de errores o residuos normalizados. En este caso de exigencias normales, se seleccionaran la Velocidad del eje X en Y en Z y la turbulencia KE, se comprobará en la gráfica que dichas variables queden por debajo de 10^{-3} residuos normalizados. Se eligen estas variables en este caso porque son las que más influyen en los cálculos

Controles de Variable Dependiente		«
Velocidad del eje X		«
Iteraciones internas	3	
Etapas de tiempo falso	0.20000	
Factor de relajamiento	1.0	
Terminación residual	0.00001000	
Velocidad del eje Y		«
Iteraciones internas	3	
Etapas de tiempo falso	0.20000	
Factor de relajamiento	1.0	
Terminación residual	0.00001000	
Velocidad del eje Z		«
Iteraciones internas	3	
Etapas de tiempo falso	0.20000	
Factor de relajamiento	1.0	
Terminación residual	0.00001000	
Presión		«
Iteraciones internas	9	
Masa		«
Terminación residual de terminación	0.00001000	
Turbulencia KE		«
Iteraciones internas	6	
Etapas de tiempo falso	0.10000	
Factor de relajamiento	1.0	
Terminación residual	0.00001000	
Tasa de Disipación de la Turbulencia KE		«
Iteraciones internas	6	
Etapas de tiempo falso	0.10000	
Factor de relajamiento	1.0	
Terminación residual	0.00001000	
Viscosidad		«
Factor de relajamiento de viscosidad	1.0	

Imagen 18. Controles de Variable Dependiente

En los controles de variables dependientes se tomaran los valores de la imagen anterior (vienen asignados por defecto) para un caso de exigencias normales.

4. Resultados

Los planos de corte del cálculo de la simulación han sido tomados a 10,50 m del suelo para las diferentes orientaciones de incisión del viento.

Se recuerda que el dato de velocidad media de viento utilizada para estas simulaciones ha sido de 10 m/s. Ya que de esta forma se es capaz de ver el máximo discomfort. Ya que cuanto mayor sea la velocidad de viento menor será el confort en las calles cruzadas.

a. Para orientación del viento: 293°

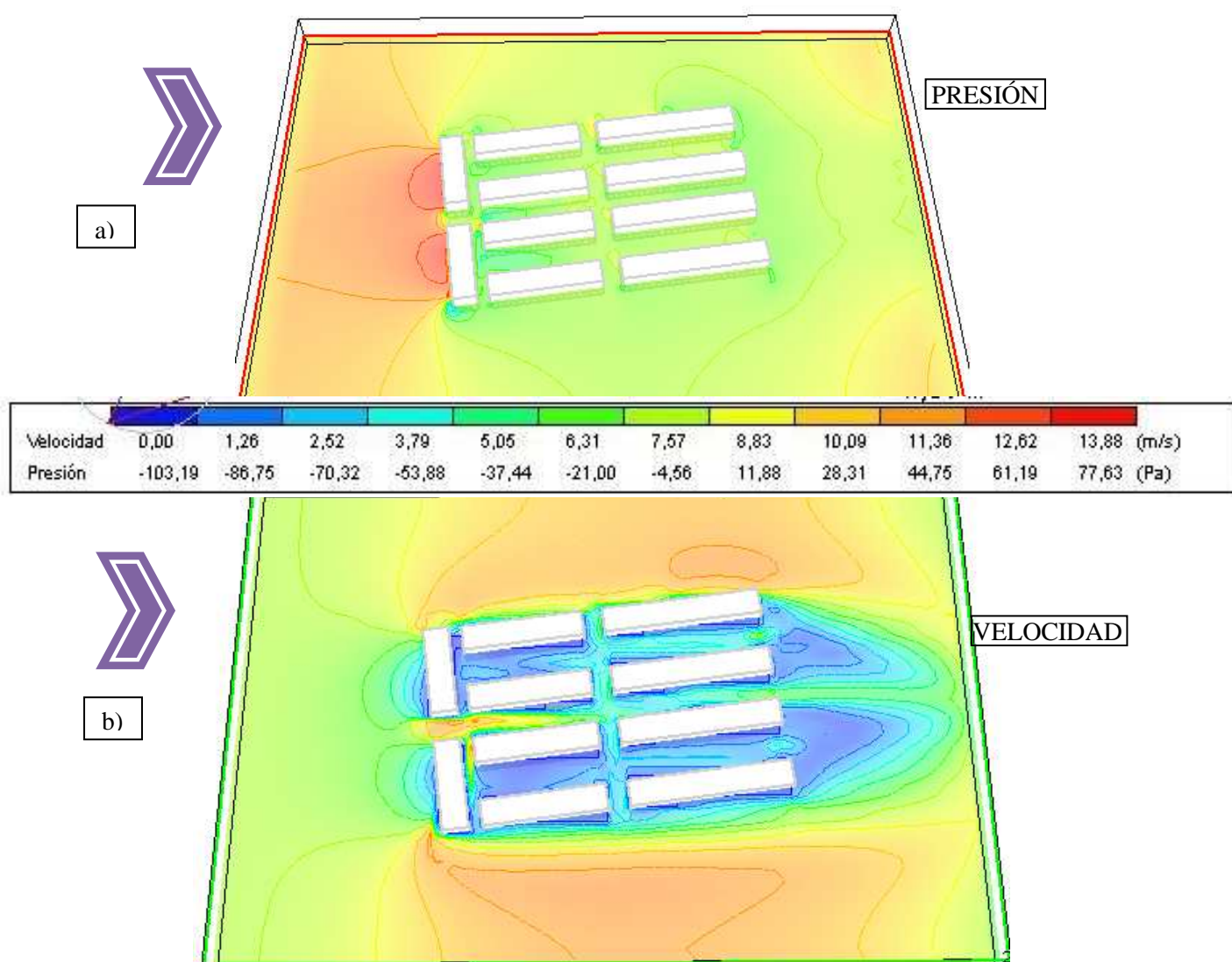


Imagen 19. Mapa de presiones a) y velocidades b) con orientación del viento a 293°

Tras haber realizado la simulación para el caso de la orientación del viento a 293° se puede observar como los edificios barrera absorben la máxima fuerza del viento, en este

caso se refleja en la zona coloreada de la imagen 9 a), marcando de esta forma a sotavento una región de bajas presiones (zona más clara verdosa).

Las velocidades máximas del viento están en torno a 13 m/s y las mínimas en torno a 3 m/s. En la imagen 9 b) se observan resultados de velocidades bajos tras los edificios barrera, pero existe una inclusión de viento de velocidad mayor entre los edificios barrera de hasta 10 m/s.

b. Para orientación del viento: 315°

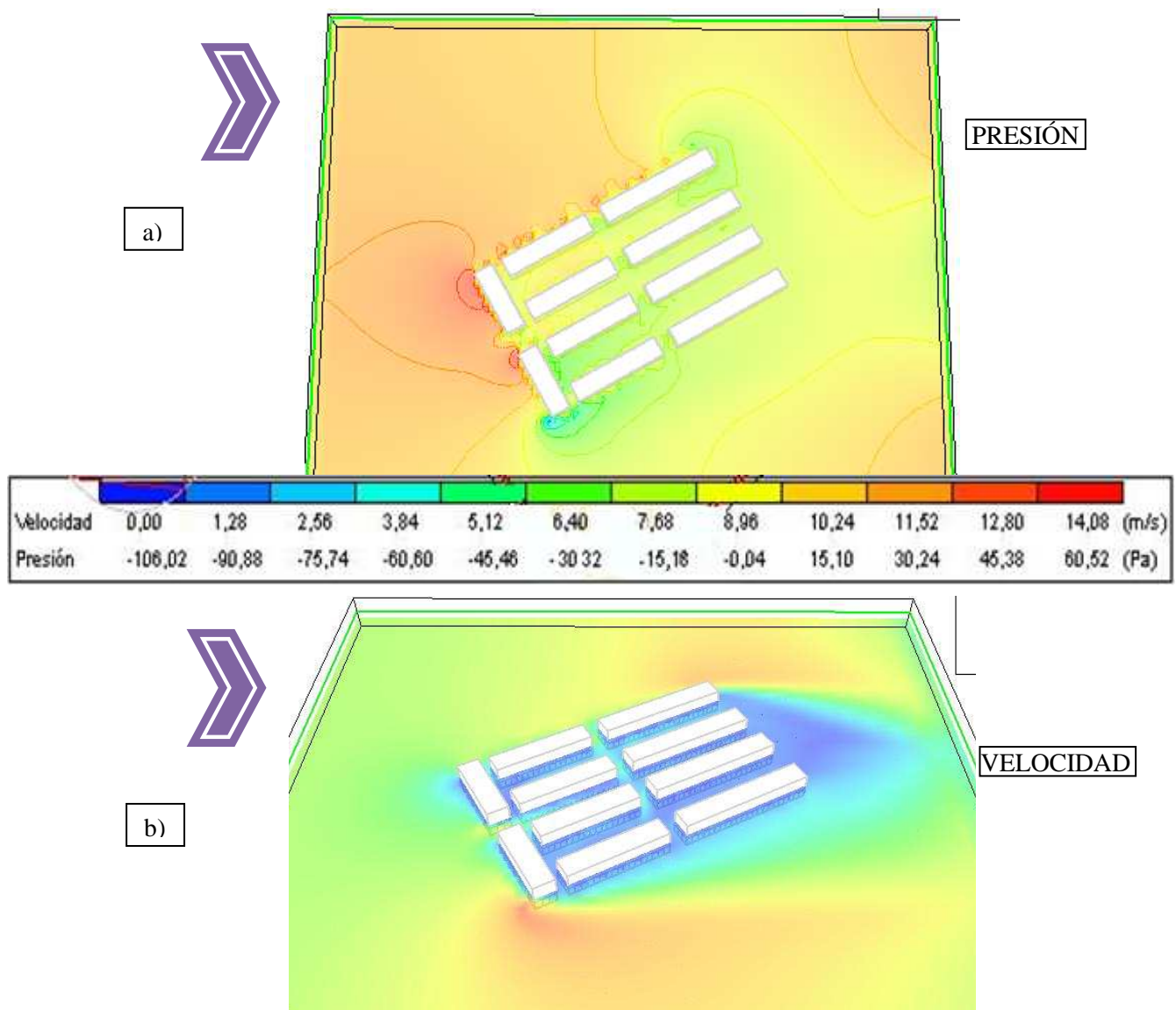


Imagen 20. Mapa de presiones a) y velocidades b) con orientación del viento a 315°

También se ha realizado la simulación para una orientación de viento de 315° ya que existían frecuencias altas de vientos para esa orientación y para ver cómo podía afectar una influencia directa del viento sobre los edificios protegidos.

Se puede observar que las velocidades máximas y mínimas son básicamente las mismas que en el caso de orientación de 293°, partiendo de una velocidad media del viento de 10 m/s fijada en la hipótesis de la simulación. No obstante se observa como en los edificios protegidos de la parte norte existen zonas de alta presión, ya que dichos edificios están expuestos al viento directamente. Es cierto que no les choca el viento tan fuertemente como a los edificios barrera, pero sí que se debería tener en cuenta en los cerramientos de dichas fachadas.

Por otra parte, en el plano de corte donde se reflejan las velocidades de viento, se puede observar que la vena de viento que se infiltraba en la calle centrar entre los edificios barrera, se ha mitigado debida a la orientación del viento que no incide directamente sobre la boca del cañón.

c. Para la velocidad más probable (4m/s) y viento a 293°

No se podía finalizar el estudio sin una simulación de CFD para las condiciones más usuales a las que se van a enfrentar estos edificios que son, dada la información suministrada por la roseta de vientos y las probabilidades de viento en Zaragoza (CENER), velocidad de 4 m/s y una orientación predominante de 293°.

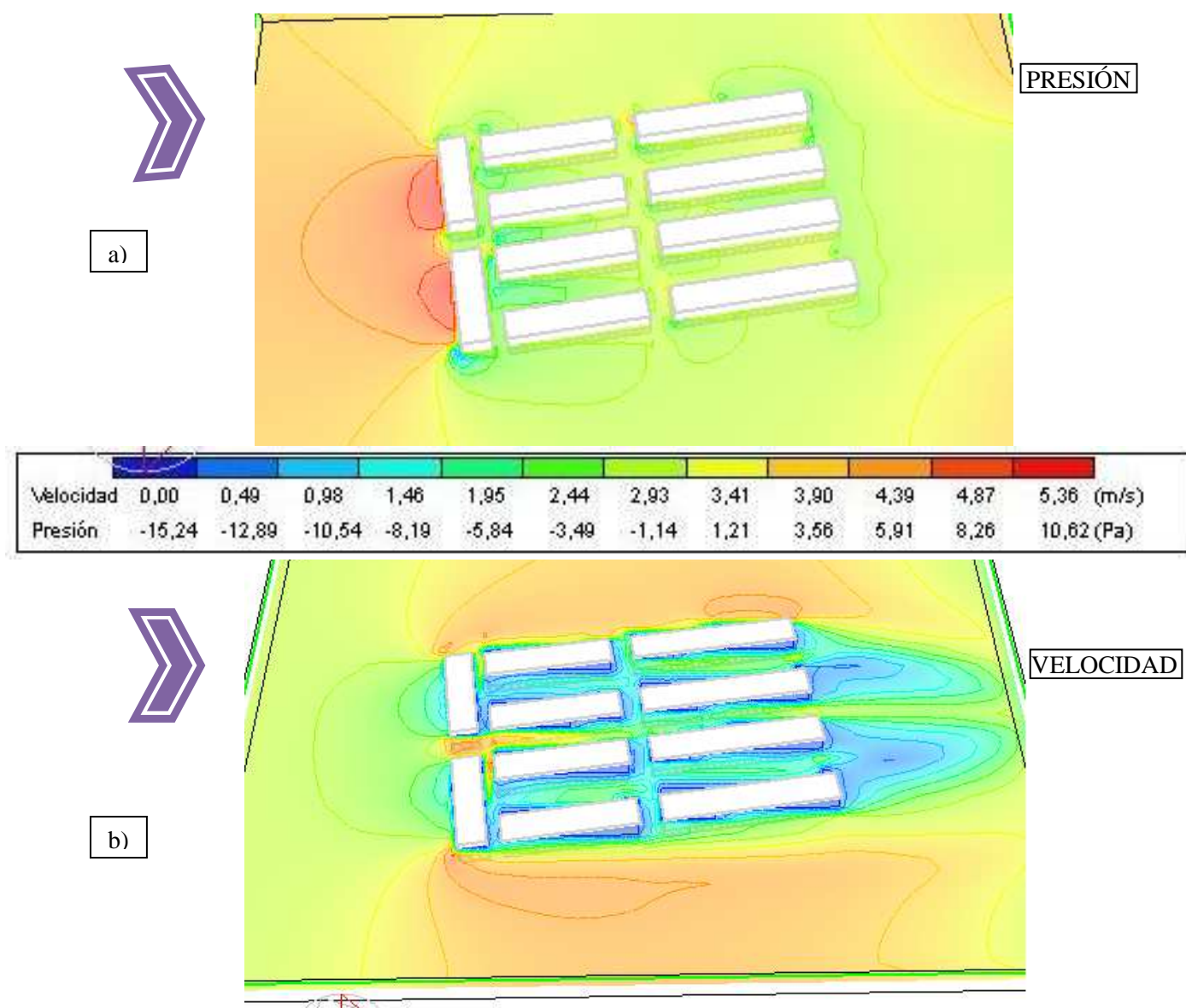


Imagen 21. Mapa de presiones a) y velocidades b) con orientación del viento a 293° con una velocidad media de viento de 4 m/s

Se obtendrían unas velocidades entre edificios de 1,46 y 2,93 m/s. Se trata de unas condiciones para 293° muy favorables para la sensación de confort. No obstante sigue existiendo una velocidad de viento ligeramente mayor en la calle central, de entre 3,41 a 4,39 m/s.

d. Para la velocidad más probable (4m/s) y viento a 315°

También se ha realizado la operación para 315° de orientación del viento. En la siguiente imagen se representan los resultados del análisis.

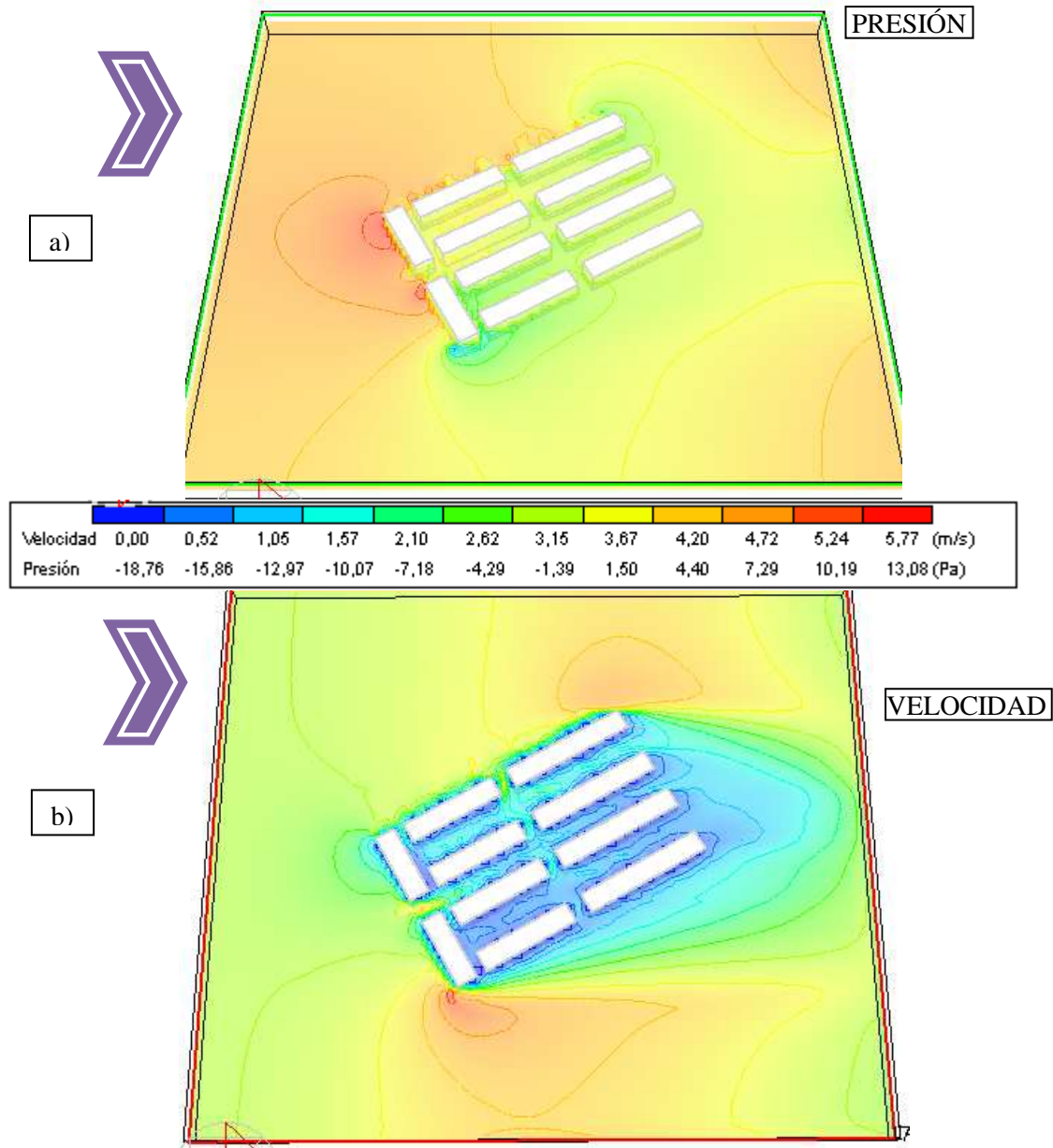


Imagen 22. Mapa de presiones a) y velocidades b) con orientación del viento a 315° con una velocidad media de viento de 4 m/s

Se obtendrían unas velocidades entre edificios de 0,52 y 1,57 m/s. Manteniendo viento a sotavento más estable, como en el caso de incisión a 293°, que la que supondría del caso de no tener el edificio barrera.

Además, se reduce también la velocidad de viento en la inclusión de la calle central, donde ahora es homogénea con el resto de espacio entre los edificios protegidos.

e. Para un viento de orientación coincidente con la orientación de los bloques (285°) y velocidad 10 m/s

Normalmente no se tendrán vientos de esa orientación ya que la roseta de vientos indicaba que la frecuencia oscilaba desde 292,5 a 315°, no obstante se ha realizado una simulación para el caso de 285° para comprobar que resultados se obtendrían y así ver la importancia de la orientación de los bloques de edificios.

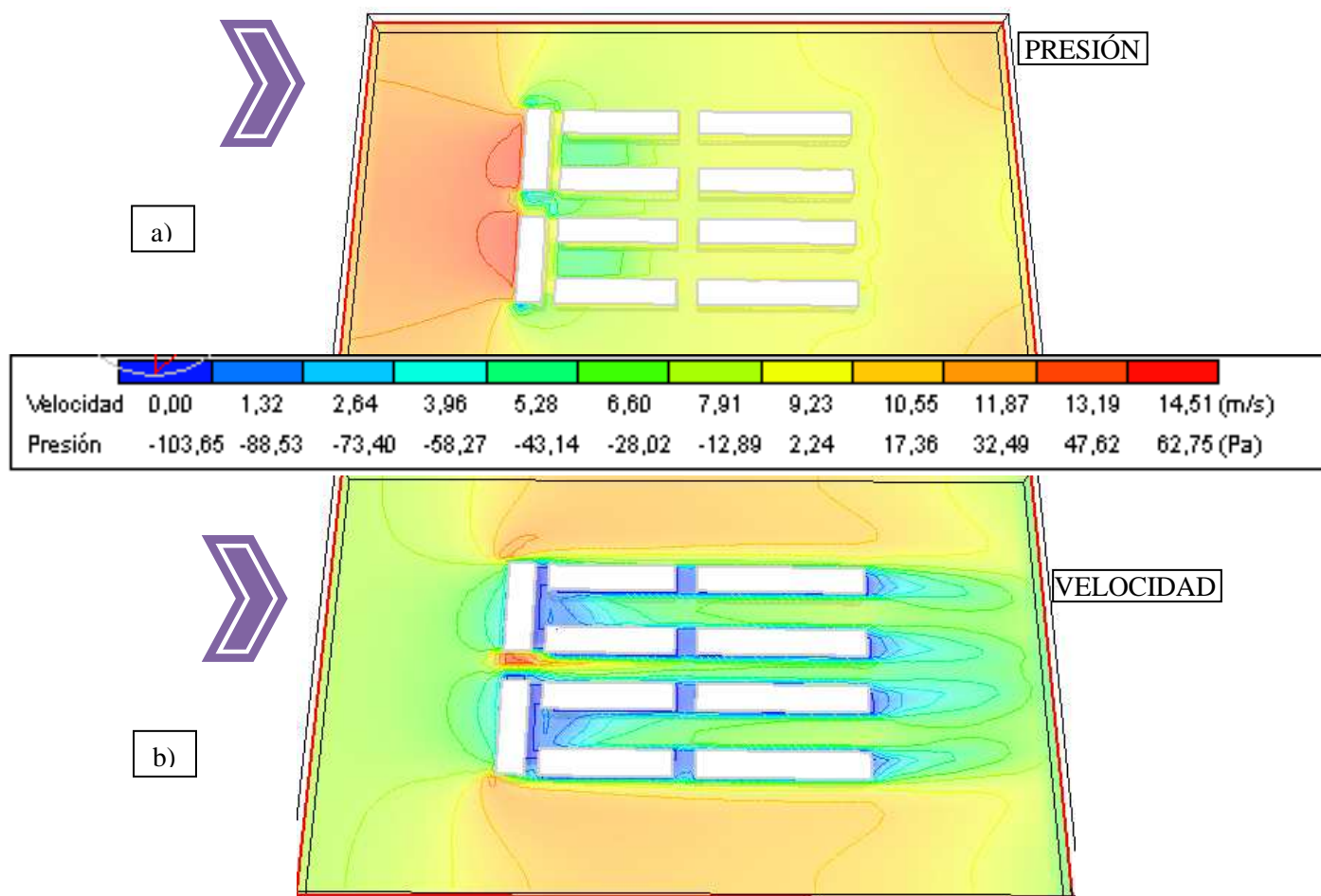


Imagen 23. Mapa de presiones a) y velocidades b) con orientación del viento a 285° con una velocidad media de viento de 10 m/s

Se comprueba que la vena de viento es mayor en el caso de orientación del viento coincidente con la calle central de los edificios que en los otros casos de orientaciones 293° y 315°.

f. Ventilación Interna

i. Ventilación forzada

Cuando se piensa en la ventilación interna forzada de estos edificios se tiene que tener en cuenta además que las bocas de entrada de aire no estén cerca del perímetro de humos del edificio ya que se podría contaminar el aire de renovación.

En la siguiente tabla se observa las velocidades más frecuentes para el correcto funcionamiento del sistema de ventilación.

Bocas de captación	m/s
Habitaciones de residencias y hoteles	1,2 a 2
Zonas públicas comerciales:	
A niveles de ocupantes en movimiento	3 a 4
Cerca de personas sentadas	2 a 3
Bocas en parte bajas de puertas	2 a 3,5
Persianas en las paredes	2,5 a 5
Captaciones a nivel de techo	4 y más
Naves industriales	5 a 10
Sistemas de alta velocidad	2 a 4
Bocas de impulsión	m/s
Estudios de radiodifusión, cabinas de grabación	1,5 a 2,5
Dormitorios de hotel	2,5 a 3
Residencias, salones regios, restaurantes lujo	2,5 a 3,5
Iglesias, antesalas importantes	2,5 a 3,5
Apartamentos, viviendas	2,5 a 4
Oficinas privadas tratadas acústicamente	2,5 a 4
Teatros	4
Oficinas particulares no tratadas	3,5 a 5
Salas de cine	5
Oficinas públicas, restaurantes	5 a 7
Almacenes comerciales, plantas altas	7,5
Sistemas de alta velocidad	3 a 8
Fábricas	5 a 10
Almacenes comerciales, plantas bajas	10

Tabla 8. Velocidad del aire atendiendo al ruido. (Manual Práctico de ventilación - Soler & Palau)

ii. Ventilación natural

La ventilación natural, como su propio nombre indica, no requiere el uso de ningún ventilador. Se aprovecha de las condiciones del flujo de viento en el perímetro del edificio que se genera mayormente por la diferencia de temperaturas.

Existen diversas técnicas para evitar el uso de ventilación forzada y aprovecharse de las condiciones del viento.

Para este caso, los edificios no están preparados para una ventilación natural de forma general ya que su uso es residencial y tan solo podría realizarse en las zonas comunes.

Así que los propios residentes son los que gestionarían individualmente este tipo de ventilación por medio de la conocida ventilación cruzada.

Esta consiste en generar aberturas, en este caso ventanas, estratégicamente ubicadas para facilitar el ingreso y salida del viento a través de los espacios interiores de los edificios, considerando la dirección de los vientos dominantes (en este caso Noroeste). La ventilación cruzada implica generar aberturas en zonas de alta y baja presión de viento de la envolvente del edificio.

El tamaño y la ubicación de las ventanas afecta al flujo de aire dentro del espacio, no obstante éstas son muy variadas.

En las siguientes imágenes se pueden observar la importancia del tamaño de la ventana o abertura.

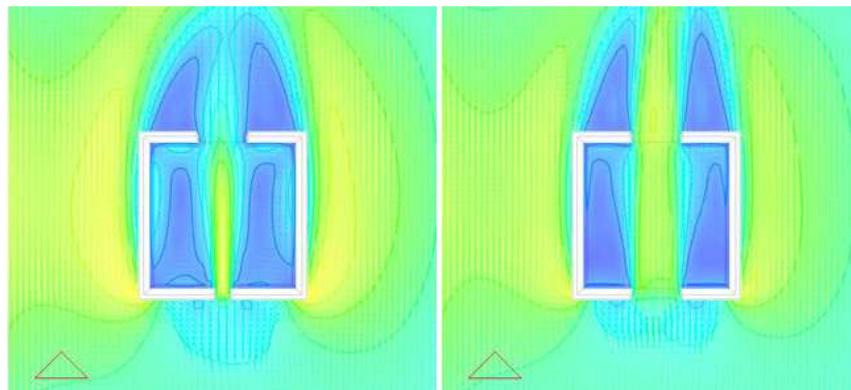


Imagen 24. Mapa de velocidades en un espacio cerrado con ventilación interna y diferentes tamaños de aberturas. (www.sol-arq.com)

Como se puede apreciar, con una abertura mayor se obtienen velocidades menores de aire de renovación, con lo que puede ser menos molesto en relación con el caso de la abertura más pequeña.

En el siguiente ejemplo de ventilación cruzada se observan dos situaciones con diferente ubicación de las aberturas de entrada y de salida.

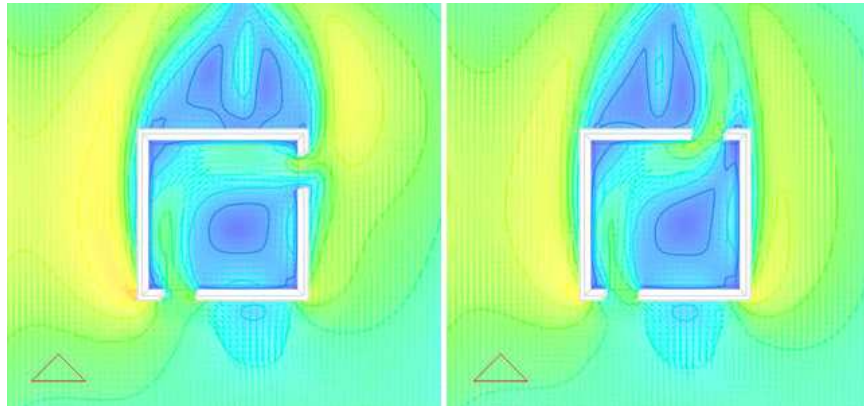


Imagen 25. Mapa de velocidades en un espacio cerrado con ventilación interna y diferentes ubicaciones de las aberturas. (www.sol-arq.com)

En este caso la ventilación cruzada más eficiente sería la de la imagen de la izquierda ya que gracias a las turbulencias el aire de renovación actúa sobre mayor área que en el otro caso.

Las ventajas de esta ventilación respecto a la ventilación forzada, son evidentes, suponen un gasto menor tanto en el uso de ventiladores.

Pero la ventilación forzada garantiza una seguridad de aporte de ventilación total a unas condiciones fijas. Sin embargo, el uso de la ventilación natural depende siempre de las condiciones ambientales externas y de las condiciones del viento.

Por tanto lo idóneo sería que el edificio tuviera un sistema de ventilación forzada pero siempre que se pueda hacer uso de la ventilación natural.

iii. Ventilación en los Edificios de Valdespartera

Tras haber realizado un estudio acerca de las ventajas de la ventilación natural respecto a los bloques referencia de Valdespartera.



Imagen 26. Ilustración real de las parcelas en Valdespartera

Se puede observar que los edificios disponen de patios acristalados con lo que facilitaría la ventilación cruzada al poder elegir la ubicación de la abertura.

En la siguiente imagen se puede observar como el edificio barrera no dispone en su fachada, donde incide el viento más fuerte, de patios acristalados, además se ha comprobado que los vientos más frecuentes que inciden tienen velocidades de 3-4 m/s que para ventilación interna, podrían suponer un poco fuertes.



Imagen 27. Ilustración real de los edificios barrera en Valdespartera

Por lo tanto la ventilación natural cruzada favorece más a los edificios protegidos por el edificio barrera que a éste mismo.

5. Conclusiones.

Tras ver los resultados de la simulación, se observa que los edificios barrera cumplen su papel de barrera frenando las altas velocidades de viento. De esta forma se obtiene para una velocidad máxima de viento en la zona de 10 m/s (muy poca probabilidad), unos vientos entre edificios de velocidad en torno a 5-6 m/s de máxima. Normalmente se darán vientos de 3-4 m/s con lo que obtendremos vientos entre los edificios de 1-3 m/s.

Para mejorar todavía más las condiciones de viento tras el edificio barrera, según indica *Christof Gromke y Bodo Ruck* en su artículo científico *Influence of trees on the dispersion of pollutants in an urban street canyon*, que mediante un estudio sobre el efecto cañón concluyen que el colocar arboles entre los bloques se obtienen mejores condiciones de confort; ya que actúan como pantalla o filtro del viento haciendo que éste se aminore y se desvíen las venas de viento, o en otras palabras, reducir e incluso en algunos casos evitar los vortex o espirales internas dentro de las calles entre bloques.

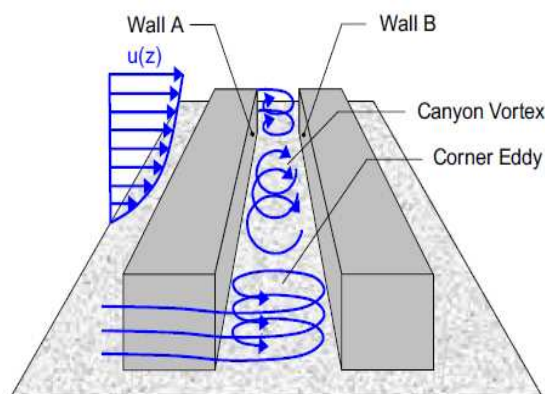


Imagen 28. Vortex en edificios (Gromke, 2008)

Además se aminoraría la vena de viento que se infiltra en la calle central y también se solventaría el problema de que estas inclusiones de viento en el resto de las calles ya que arrastrarían parte del humo de las chimeneas de los edificios barrera, problema que afectaría a la ventilación natural interna de los bloques, ya que el aire de renovación sería contaminado.

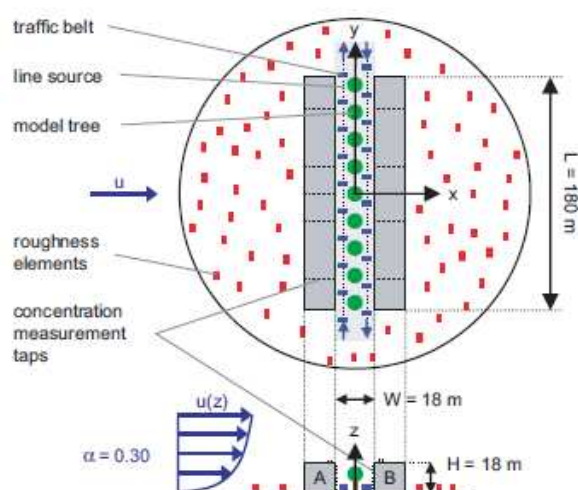


Imagen 29. Arboles que aminoran la entrada de viento contaminante (Gromke, 2008)

Por tanto tras haber realizado el estudio se puede concluir que la organización de los bloques según la teoría del edificio barrera, garantiza una calidad del aire mayor o lo que es lo mismo, un confort tanto para las personas entre los edificios como para la ventilación interna de estos.

Este análisis concluye que la simulación CFD puede ayudar a la elección del sistema de ventilación interna, tanto en ventilación forzada como natural. No obstante, para los edificios barrera no siempre sería tan recomendable el uso de ventilación natural en la fachada de incisión del viento, ya que las velocidades serían bastante altas en relación

con los edificios protegidos a sotavento.

Por supuesto, añadir que las fachadas expuestas, no solo en el edificio barrera, sino en los que cuyas fachadas reciben grandes velocidades de viento, tendrán que disponer de un cerramiento más conservador en comparación con las demás fachadas.

Se podría continuar el presente estudio investigando sobre la viabilidad de situar mini-aerogeneradores en puntos donde el viento impacta directamente como por ejemplo en los siguientes puntos.



Imagen 30. Líneas de Mejora: Energía Mini-Eólica.

Además, sería interesante, también, progresar el estudio con software más avanzado como Fluent, sobre todo para el caso de la ventilación interna ya que permite analizar el comportamiento del viento en la renovación natural de aire en locales cerrados con mayor facilidad y mejor definición que Design Builder.

6. Bibliografía

a. Artículos Científicos

J.M. Crowther, D. Mumovic, Z. Stevanovic (2004) *Analysis of Numerically Modelled Local Concentration Gradients in Street Canyons: Implications for Air Quality Monitoring*, Environmental Department of Glasgow Caledonian University, Scotland.

Xiaomin Xie, Zhen Huang, Jia-Song Wang (2005) *Impact of building configuration on air quality in street canyon*, School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai, China.

Kambiz Nazridoust, Goodarz Ahmadi (2006) *Airflow and pollutant transport in street canyons*, Department of Mechanical and Aeronautical Engineering, Clarkson University, Potsdam NY, USA.

Christof Gromke, Riccardo Buccolieri, Silvana Di Sabatino, Bodo Ruck (2008) *Dispersion study in a street canyon with tree planting by means of wind tunnel and numerical investigations – Evaluation of CFD data with experimental data*, Laboratory of Building and Environmental Aerodynamics, Institute for Hydromechanics, University of Karlsruhe, Germany.

Christof Gromke, Bodo Ruck (2006) *Influence of trees on the dispersion of pollutants in an urban street canyon – Experimental investigation of the flow and concentration field*, Laboratory of Building and Environmental Aerodynamics, Institute for Hydromechanics, University of Karlsruhe, Germany.

T. van Hooff, B. Blocken (2009) *Coupled urban wind flow and indoor natural ventilation modeling on a high-resolution grid: A case study for the Amsterdam Arena Stadium*, Building Physics and Systems, Eindhoven University of Technology, Eindhoven, The Netherlands.

Shinsuke Kato, Hong Huang (2009) *Ventilation efficiency of void space surrounded by buildings with wind blowing over built-up urban area*, Institute of Industrial Science, The University of Tokyo, 4-6-1 Komaba, Meguro-ku, Tokyo, Japan.

Mahmoud Bady, Shinsuke Kato, Hong Huang (2007) *Towards the application of indoor ventilation efficiency indices to evaluate the air quality of urban areas*, Institute of Industrial Science, The University of Tokyo, 4-6-1 Komaba, Meguro-ku, Tokyo, Japan.

B. Blocken, J. Persoon (2009) *Pedestrian wind comfort around a large football stadium in an urban environment: CFD simulation, validation and application of the new Dutch wind nuisance standard*, Building Physics and Systems, Eindhoven University of Technology, The Netherlands.

D. Pearlmutter, P. Berliner, E. Shaviv (2006) *Integrated modeling of pedestrian energy exchange and thermal comfort in urban street canyons*, J. Blaustein Institutes for Desert Research, Ben-Gurion University of the Negev, Sede-Boqer Campus , Israel.

b. Páginas Web

www.sol-arq-com

www.solerpalau.es

www.cener.com

www.ecodiseño.org

<http://www.catastro.meh.es/>

<http://www.sciencedirect.com/>

c. Publicaciones

Turégano J. A, Velasco M^a Carmen, *Arquitectura Bioclimática y Urbanismo Sostenible (vol. II)* pag. 333-343. Prensas Universitarias Zaragoza.

M. Santamouris, *Energy and Climate in the urban built environment (2001)*, *The Canyon effect*, Department of Applied Physics, University of Athens.

T. R. Oke (2010), *The distinction between canopy and boundary-layer urban heat islands*. 269-277. Atmosphere. University of British Columbia, Vancouver, B.C.

Airflow Around Buildings, ASHRAE Fundamentals Handbook 2001 – Chapter 16

Izard, Jean Louis & Guyot, Alan. (1980). *Arquitectura Bioclimática*. Edit Gili, Barcelona.

Givoni B, A. (1976) *Man, Climate and Architecture*. Architectural Science Services. Publishers. Ltd. London.

Mazria, Edward. (1983). El Libro de la Energía Solar Pasiva. Edit Gili.

Olgyay, Víctor. (1998). Arquitectura y clima. Manual de diseño bioclimático para arquitectos y urbanistas. Edit Gustavo Gili, Barcelona.

d. Otros

CFD en la arquitectura bioclimática, (PowerPoint), Grupo de Energía y Edificación. Departamento de Máquinas y Motores Térmicos, Universidad de Zaragoza, 2011.

CTE – Sección HS 3 Calidad del aire interior.

Manual Práctico de ventilación (Soler & Palau)

ASEPEYO. Documentación técnica Prevención – Confort Térmico – Dirección de Seguridad e Higiene, 2005.