

Trabajo Fin de Grado Ingeniería  
de las Tecnologías Industriales  
*Intensificación energética*

Caracterización de ventilación nocturna en edificios  
mediante técnicas CFD

Autor: Olga Sánchez Roelas

Tutor: José Luis Molina Félix

Dep. Ingeniería Energética  
Escuela Técnica Superior de Ingeniería  
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2015





Trabajo Fin de Grado  
Ingeniería en las Tecnologías Industriales

# **Caracterización de ventilación nocturna en edificios mediante técnicas CFD**

Autora:

Olga Sánchez Roelas

Tutor:

José Luis Molina Félix

Catedrático

Co-tutor:

José Sánchez Ramos

Investigador

Dep. Ingeniería Energética  
Escuela Técnica Superior de Ingeniería  
Universidad de Sevilla  
Sevilla, 2015



Trabajo Fin de Grado: Caracterización de ventilación nocturna en edificios mediante técnicas CFD

Autor: Olga Sánchez Roelas

Tutor: José Luis Molina Félix

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2015

El Secretario del Tribunal



*A mis padres, hermana y familia  
por sentirlos tan cerca siempre.*



## RESUMEN

---

El aprovechamiento del calor nocturno que se acumula en los muros de edificios lleva al estudio de la implementación de un procedimiento para la caracterización de la ventilación nocturna en edificios, lo que supone un ahorro energético. Este procedimiento permitirá el diseño de nuevos edificios con este tipo de aprovechamiento energético.

En este trabajo se puede encontrar reflejada la literatura sobre la actualidad en cuanto a ventilación se refiere. Se presentan las herramientas necesarias para la caracterización de la ventilación nocturna, en las distintas situaciones existentes, desde la definición de las condiciones de contorno, pasando por el cálculo de coeficientes de transferencia convectiva, siguiendo por la caracterización de patrones de flujo para terminar evaluando los ahorros.



<b>RESUMEN</b>	<b>9</b>
<b>ÍNDICE</b>	<b>11</b>
<b>ÍNDICE DE TABLAS</b>	<b>13</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b>	<b>15</b>
<b>PRESENTACIÓN</b>	<b>19</b>
<b>1 INTRODUCCIÓN</b>	<b>21</b>
1.1 <i>CONTEXTO</i>	21
1.1.1 H2020	22
1.1.2 Directiva EPBD (Energy Performance of Buildings Directive)	23
1.1.3 Normativa española	25
1.1.4 Retos y visión de futuro	26
1.2 <i>VENTILACIÓN ACTIVA</i>	30
1.2.1 Inercia térmica	31
1.2.2 Ventilación activa	33
1.3 <i>ESTADO DEL ARTE</i>	35
1.3.1 Análisis con CFD de la ventilación en edificios con posiciones de apertura [4], [5]	35
1.3.2 Actuación del night cooling en el diseño de habitaciones basado en CFD [8], [9]	37
1.3.3 Efecto de la refrigeración en la noche en la productividad y bioquímica [13]	38
1.3.4 Modelado en CFD de la transferencia de calor convectivo interior	39
1.4 <i>OBJETIVOS DEL TRABAJO FIN DE GRADO</i>	40
<b>2 PROCEDIMIENTO</b>	<b>41</b>
2.1 <i>ETAPA 1: CFD</i>	41
2.1.1 Alcance	41
2.1.2 Ideas básicas CFD	41
2.1.3 Caracterización aerodinámica del edificio	46
2.1.4 Protocolo General de cálculo CFD de coeficientes de transferencia de calor convectivo.	48
2.2 <i>ETAPA 2: EVALUACIÓN DE AHORROS</i>	49
2.3 <i>ETAPA 3: ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA</i>	51
2.3.1 Plazo de recuperación del Capital	52
2.3.2 Tasa interna de Rentabilidad (TIR)	52
2.3.3 Ahorro obtenido	52
<b>3 APLICACIONES</b>	<b>53</b>
3.1 <i>APLICACIÓN 1: DEFINICIÓN DE CONDICIONES DE CONTORNO</i>	53
3.1.1 Descripción	53
3.1.2 Geometría	53
3.1.3 Malla	54
3.1.4 Resultados	55
3.2 <i>APLICACIÓN 2: CÁLCULO DE COEFICIENTES DE TRANSFERENCIA CONVECTIVA</i>	63
3.2.1 Descripción	63
3.2.2 Modelización	64
3.2.3 Resultados CFD	65

3.2.4	Conclusiones	70
3.3	<i>APLICACIÓN 3: CARACTERIZACIÓN DE PATRONES DE FLUJO</i>	71
3.3.1	Descripción	71
3.3.2	Efecto del viento-condiciones de contorno	71
3.3.3	Definición de los casos	74
3.3.4	Resultados	77
3.3.5	Conclusiones	81
3.4	<i>APLICACIÓN 4: EVALUACIÓN DE AHORROS</i>	82
3.4.1	Descripción	82
3.4.2	Cálculo de h mediante CFD	83
3.4.3	HULC	86
3.4.4	Ventilación nocturna	89
<b>4</b>	<b>CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS</b>	<b>91</b>
<b>5</b>	<b>ANEXO I</b>	<b>93</b>
<b>6</b>	<b>ANEXO II</b>	<b>95</b>
<b>7</b>	<b>REFERENCIAS</b>	<b>97</b>

# ÍNDICE DE TABLAS

---

Tabla 1. Herramientas desarrolladas para verificación de estándares energéticas en EU	25
Tabla 2. Valores de $C_p$ para un edificio expuesto	47
Tabla 3. Valores de $C_p$ para un edificio rodeado por obstrucciones equivalentes a la mitad del edificio.	47
Tabla 4. Valores de $C_p$ para un edificio rodeado por obstrucciones equivalentes a la altura del edificio.	47
Tabla 5. Parámetros de la simulación 1M-CL	56
Tabla 6. Comparación Nu Caso 1	68
Tabla 7. Comparación Nu Caso 2	69
Tabla 8. Relación $b/L$ con $Un$	70
Tabla 9. Comparación Nu Caso 3	70
Tabla 10. Comparación Nu Caso 4	70
Tabla 11. Componentes de la condición de contorno impuesta por el viento incidente en la fachada.	74
Tabla 12. Valores obtenidos en la primera iteración que demuestran la convergencia en malla	77
Tabla 13. Configuraciones a estudiar	77
Tabla 14. Casos Zona 1	78
Tabla 15. Cantidad de aire evacuado/introducido en el recinto	79
Tabla 16. Cantidad de aire evacuado/introducido en el recinto	81
Tabla 17. Cantidad de aire evacuado/introducido en el recinto	81
Tabla 18. Ejemplo Ventilador para 25 ren/h en salón y 4 ren/h en dormitorios	83
Tabla 19. Valores de $h$ media en cada una de las paredes	85
Tabla 20. Tipología cerramiento	86
Tabla 21. Temperatura media interior, radiación global y temperatura media exterior	89
Tabla 22. Demanda refrigeración y ahorro	89
Tabla 23. Coeficientes de transferencia por zona	90



# ÍNDICE DE FIGURAS

---

Figura 1. Transmisión de calor en un muro	30
Figura 2. Importancia de la inercia térmica	31
Figura 3. Aprovechamiento del efecto solar	32
Figura 4 Lugares de colocación de la masa térmica en el edificio [3]	33
Figura 5. Aprovechamiento material con elevada inercia térmica	33
Figura 6. Esquema de funcionamiento del free-cooling	35
Figura 7. Vista edificio estudiado	36
Figura 8. Análisis homogeneidad horizontal	36
Figura 9. Comparación de la velocidad media en el plano vertical, a partir de PIV y CFD	37
Figura 10. Impacto de la resolución de la cuadrilla	37
Figura 11. Impacto del modelo de turbulencia. Comparación entre PIV y CFD	37
Figura 12. Influencia de la energía cinética turbulenta	37
Figura 13. Experimento nombrado	38
Figura 14. Resultado experimento	39
Figura 15. Esquema de la capa turbulenta y la relación de $y^{++}$	44
Figura 16. Representación de los tratamientos cercanos al muro	45
Figura 17. Distribución de la presión del viento sobre las fachadas para distinta incidencia del viento	46
Figura 18. Resultado típico del TNO Cp-Generator: Cp versus dirección del viento.	48
Figura 19. Herramienta unificada LIDER-CALENER	50
Figura 20. Factor de utilización para el régimen de refrigeración	51
Figura 21. De izquierda a derecha: Faro de Cabo Hatteras, Faro de Pensacola, Faro Split Point.	53
Figura 22. Diseño inicial del Faro	54
Figura 23. Base del faro	54
Figura 24. Parte superior del faro	54
Figura 25. Planta superior e inferior del faro	54
Figura 26. Modelo inicial del túnel de viento	54
Figura 27. Capas de prismas alrededor de lFaro	55
Figura 28. Detalle de las 20 capas de prismas alrededor de la superficie de la columna del Faro.	55
Figura 29. Planos de medición	55
Figura 30. Convergencia de la solución para 500 iteraciones de la Simulación 1B	57
Figura 31. Gráfica de la evolución de la velocidad de la simulación	57
Figura 32. Detalle del desprendimiento de la capa límite y comportamiento del fluido.	57
Figura 33. Evolución de las velocidades y del fluido en la estela turbulenta en el plano vertical.	57
Figura 34. Flujo ideal alrededor de un cilindro sin recirculación	58
Figura 35. Vectores de velocidad en planos horizontales a 37m , 22m y a 7m, en la Simulación 1B	58
Figura 36. Vectores de velocidad en el plano horizontal a 7m del suelo para 0.5 m/s.	59

Figura 37. Metodo para el analisis del perfil de velocidades y el desprendimiento de la capa límite.	59
Figura 38. Graficas de los perfiles de velocidades que detallan los valores que adquiere la velocidad	60
Figura 39. Contorno de presiones en el plano horizontal para la Simulación 1M-CL y 2M	61
Figura 40. Contorno de presiones totales en el plano vertical para la simulación 1M-CL y 2M	61
Figura 41. Distribución de presiones ( $C_p$ ) en el plano horizontal que corta la columna por la mitad.	61
Figura 42. Evolución de las velocidades y estela turbulenta en el plano vertical por la mitad	62
Figura 43. Detalle del desprendimiento de la capa límite y comportamiento del fluido, 1M y 4B.	62
Figura 44: Esquema del estudio realizado	63
Figura 45: Esquema de la malla	64
Figura 46. Transición a la turbulencia en régimen turbulento	64
Figura 47. Esquema conducto circular	66
Figura 48: perfiles de velocidades $Re\ 63e+4$	66
Figura 49. Esquema placa plana.	67
Figura 50: Nusselt frente a la posición	68
Figura 51. Imagen exterior del edificio bajo reforma	71
Figura 52. Imagen de la fachada Este del edificio de las viviendas estudiadas.	71
Figura 53. Componentes de la velocidad del viento	72
Figura 54. Orientación eólica dominante Málaga [16]	72
Figura 55. Plano de la vivienda con las separaciones realizadas y la señalización de los huecos	73
Figura 56. Capturas de la implementación en FLUENT	73
Figura 57. Plano del perfil del edificio	74
Figura 58. Disposición de huecos en fachada de Zona 1	75
Figura 59. Disposición configuraciones posibles en la fachada de Zona 2	75
Figura 60. Huecos de entrada y salida en fachada	76
Figura 61. Esquema de isovalores de $y^+$ , según la malla implementada	77
Figura 62. Líneas de flujo generadas para la configuración de huecos en el caso 8	78
Figura 63. Líneas de flujo generadas para la configuración de huecos en el caso 9	78
Figura 64. Líneas de flujo generadas para la configuración de huecos en el caso 10	78
Figura 65. Líneas de flujo generadas para la configuración de huecos en el caso 11	78
Figura 66. Caso A	79
Figura 67. Caso C	79
Figura 68. Caso B	79
Figura 69. Caso D	79
Figura 70. Caso E	79
Figura 71. Caso F	79
Figura 72. Líneas de flujo generadas para la configuración de huecos en el caso 1	80
Figura 73. Líneas de flujo generadas para la configuración de huecos en el caso 2	80
Figura 74. Líneas de flujo generadas para la configuración de huecos en el caso 3	80
Figura 75. Líneas de flujo generadas para la configuración de huecos en el caso 5	80

Figura 76. Líneas de flujo generadas para la configuración de huecos en el caso 4	80
Figura 77. Líneas de flujo generadas para la configuración de huecos en el caso 6	80
Figura 78. Líneas de flujo generadas para la configuración de huecos en el caso extra	81
Figura 79. Incremento de la inercia en la envuelta del edificio mediante cerramientos de hormigón	82
Figura 80. Simulación ventilación	83
Figura 81. Mallado del recinto a estudiar, salón	84
Figura 82. Se imponen las condiciones de contorno	84
Figura 83. Discretización realizada	85
Figura 84. Evolución térmica del recinto horas nocturna	85
Figura 85. Velocidad del aire en el salón.	85
Figura 86. Geometría vivienda unifamiliar	86
Figura 87. Geometría vivienda unifamiliar (2)	86
Figura 88. Dimensiones vivienda unifamiliar	86
Figura 89. Dimensiones ventana 1	87
Figura 90. Dimensiones ventana 2	87
Figura 91. Efidicio por zonas	90



# PRESENTACIÓN

---

Este trabajo con título “Caracterización de ventilación nocturna en edificios mediante técnicas CFD ”, elaborado por Olga Sánchez Roelas y dirigido por Don José Luis Molina Félix, es el trabajo fin del grado “Grado en Ingeniería de las Tecnologías Industriales” de la Universidad de Sevilla. Además ha contado con la cotutoría de D. José Sánchez Ramos, sin su ayuda este trabajo no habría podido salir adelante. Eternamente agradecida por sus horas de apoyo y dedicación.

El objetivo principal del trabajo es la implementación de un procedimiento para la caracterización de la ventilación nocturna en edificios y el ahorro energético que esto supone. Esto permitirá el diseño de edificios con este tipo de aprovechamientos energéticos.

El trabajo realizado se encuentra estructurado en tres bloques:

En el primero de ellos se muestra una introducción a la situación actual en cuanto a normativa existente, técnicas de ventilación utilizadas actualmente y ejemplos de artículos publicados relacionados con la temática.

En el segundo bloque, se explican las herramientas que van a ser necesarias para llevar a cabo las aplicaciones referidas para la optimización de la ventilación nocturna.

Finalmente, en el último bloque, se encuentran las aplicaciones necesarias para el estudio de la ventilación nocturna en edificios, que son presentadas a continuación:

- Aplicación 1: Definición de condiciones de contorno, caracterizando los flujos de salida y entrada de aire y generando los patrones.
- Aplicación 2: Cálculo de coeficientes de transferencia convectiva, caracterizando la aerodinámica del edificio para aprovechar el viento.
- Aplicación 3: Caracterización de patrones de flujo, calculando coeficientes de transferencia convectivo con calidad suficiente.
- Aplicación 4: Evaluación de ahorros, valorando el efecto energético en una herramienta de simulación.



# 1 INTRODUCCIÓN

---

## 1.1 CONTEXTO

El uso de energía en los edificios residenciales y comerciales es responsable del 40 %, aproximadamente, del consumo total de energía final de la Unión Europea y del 36 % de las emisiones totales comunitarias de CO<sub>2</sub>. El potencial de ahorro rentable de energía para 2020 es importante: puede llegarse a utilizar un 30 % menos de energía en este sector, lo que equivale a una reducción del 11 % en el uso de energía final de la UE. Sin embargo, esa demanda energética crece como consecuencia del aumento en la construcción, especialmente en países emergentes como China e India. Por tanto, los edificios pueden llegar a ser uno de los principales campos de batalla en la lucha por un mejor uso de la energía y contra el Cambio Climático.

Hay que añadir que se trata de una incidencia a largo plazo, pues el producto en cuestión presenta una gran durabilidad. De hecho, se estima que, sólo en Europa, los edificios actualmente existentes consumirán en el año 2050 alrededor de los dos tercios de todo lo que consumirá el sector de la edificación (G. Henderson y otros, “Energy labelling of Existing Buildings”, Proceedings of the 2001 ECEEE summer study).

En la Unión Europea se ha dado el primer paso con el siguiente compromiso “Eficiencia energética: alcanzar el objetivo del 20 %”. Las autoridades europeas se comprometieron a reducir para 2020 el consumo de energía primaria en un 20 % respecto a las proyecciones previstas. Aumentar la eficiencia energética es la forma más rentable de reducir el consumo de energía manteniendo a la vez un nivel equivalente de actividad económica. Ese aumento también sirve para tratar los desafíos energéticos clave, a saber, el cambio climático, la seguridad energética y la competitividad.

Este compromiso se traduce en un cambio en la legislación comunitaria sobre eficiencia energética, con el objetivo de mejorar considerablemente la eficiencia energética de sectores clave consumidores de energía. Sin embargo, la legislación vigente al respecto no va a provocar por sí sola un ahorro de energía suficiente para alcanzar este objetivo del 20 % de reducción. Entre los principales obstáculos que se oponen a la mejora de la eficiencia energética pueden citarse: la deficiente aplicación de la legislación vigente, la falta de concienciación de los consumidores, y la ausencia de estructuras adecuadas que lleven a inversiones fundamentales en edificios, productos y servicios eficientes energéticamente, así como a la aceptación comercial de estos. La evaluación de los planes nacionales de acción para la eficiencia energética, pone de manifiesto que no es lo mismo el compromiso político de los Estados miembros para mejorar la eficiencia energética que sus acciones. Los Estados miembros tienen que aplicar la legislación correspondiente de forma más ágil y efectiva. Para incrementar más la eficiencia energética es necesario elaborar nuevos instrumentos.

El objetivo de la Unión Europea de reducir el consumo de energía en un 20% para 2020 requiere una significativa inversión en eficiencia energética, sobre todo en los próximos años, además de significativa tiene que ser ágil. Por estos motivos, el crecimiento de las compañías de servicios energéticos en edificios jugará un papel fundamental, al favorecer la competencia de entidades privadas en el aumento de la eficiencia energética, no por obligatoriedad si no por el ahorro energético, traducido a ganancias monetarias, acercando la meta del 20% comunitario.

En vistas de la necesidad de estas empresas, los mercados de financiación para Contratos de Mejora Energética (EPC) y de Gestión Energéticas (CEM) están creciendo. Unido a esto, se han incrementado el número de cuerpos de la administración pública que demandan contratos con ESCOs para auditar, gestionar y mantener sus propios edificios. Esta situación se traduce no solo en un cambio de legislación si no de financiación para aprovechar esta oportunidad y reto.

La necesidad de construir de una manera más eficiente conlleva a la necesidad de desarrollar este tipo de estudios, que favorecen y agilizan la toma de decisiones en la fase de diseño de los edificios de alta eficiencia.

A día de hoy, el concepto de edificio de consumo de energía casi nula en España aún es objeto de debate y todavía no se ha definido con exactitud. Aunque se están implantando estrategias para conseguir este tipo de

edificios sin definir del todo, como la primera modificación en 2013 del Documento Básico de Ahorro de Energía del Código Técnico de la Edificación (CTE), España debe empezar a trabajar más en serio en la realización de un edificio de referencia de alta eficiencia energética.

La Directiva 2010/31 es muy clara: los Estados miembros deben tomar las medidas necesarias para asegurar que los edificios nuevos cumplan los requerimientos mínimos de eficiencia de energía. Antes de que se inicie la construcción, se debe tener en cuenta la viabilidad técnica, medioambiental y económica de instalaciones alternativas de alta eficiencia. Además se han impuesto dos obligaciones:

- Para 2018 todos los edificios ocupados y que sean propiedad de autoridades públicas de nueva construcción deben ser edificios de consumo de energía casi nula.
- Para 2020 todos los edificios de nueva construcción deben ser edificios de energía casi nula. [1]

A falta de tres años para que se cumpla el plazo, aún queda un largo camino por recorrer. Es por eso que se desarrolla este estudio. Cuando para los agentes de la construcción todo sean prisas, esta herramienta rápida y sencilla les permitirá conocer la demanda y sus variaciones en función de las medidas que vaya incorporando y, así, tomar decisiones en poco tiempo con respecto al proyecto que presenten.

### 1.1.1 H2020

El Horizonte 2020 (H2020) [2] se trata de un *Programa Marco* en el que la Unión Europea centra una parte importante de sus investigaciones. Cuenta con un presupuesto de aproximadamente 76 880 M€ con los que, hasta 2020, se pretende lograr los siguientes objetivos:

- La excelencia en la ciencia europea
- El desarrollo de tecnologías y sus aplicaciones para conseguir una Europa más competitiva industrialmente
- La investigación sobre las cuestiones que afectan a los europeos

Dentro de este último objetivo, se especifican los temas a tratar, entre los que se encuentra la energía: se pretende conseguir una energía *segura, limpia y eficiente*. Se trata de uno de los retos sociales que plantea el H2020. Se persigue el paso a un sistema energético posible, seguro, competitivo, que sea aceptado por la población y que se pueda mantener. Con ello, se pretende conseguir una reducción de la dependencia actual de los combustibles fósiles, pues cada vez hay una mayor carencia de recursos con el aumento de las necesidades energéticas y del cambio climático.

Las líneas de actuación de este reto social se central en:

1. Suministrar electricidad a bajo coste: se pretende desarrollar el potencial de la energía eólica y de sistemas de energía solar competitivos y seguros para el medio ambiente. Además se busca la evolución otras formas de energía renovable como la geotérmica.
2. Lograr una red eléctrica única en Europa: se persigue una red que responda a la creación de un mercado para todo el continente, en el que se integren las fuentes de energía renovables y en la que las interacciones entre todos los usuarios (clientes y proveedores de energía) estén bien gestionadas.
3. Emplear combustibles alternativos y fuentes de energía móviles: además de apostar por otro tipo de combustibles, se trabaja por la sostenibilidad y competitividad de la bioenergía, así como facilitar el comercio de pilas de combustible y tecnologías que trabajan con hidrógeno.
4. Promover nuevas tecnologías y conocimientos: se debe realizar una investigación en varias disciplinas relacionadas con la energía, que permita el avance de tecnologías y la competitividad y sostenibilidad de éstas.
5. Tomar decisiones con firmeza y conseguir el compromiso público: se facilita a los responsables de las políticas un análisis contrastado que se basa en el conocimiento de servicios, infraestructuras, tecnologías y mercados energéticos y en el comportamiento de los consumidores.
6. Conseguir la absorción de las innovaciones en cuanto a energía por el mercado: se trata de crear unas condiciones favorables de mercado en cuanto a normas, administración y financiación, para soluciones renovables y eficientes.

7. Reducir el consumo de energía y las emisiones de CO<sub>2</sub>: se busca un uso inteligente de la energía y un aprovechamiento del potencial de los sistemas eficientes y renovables de refrigeración y calefacción.

En esta materia de reducción del consumo de energía y emisiones, los objetivos que se pretenden conseguir para 2020 son la reducción en un 20% del consumo energético, fomentando la eficiencia energética y vinculando la energía procedente de fuentes renovables, de modo que ésta suponga un 20% del consumo energético total de la Unión para ese año.

### **1.1.2 Directiva EPBD (Energy Performance of Buildings Directive)**

Se trata de la Directiva 2010/31/UE [1] del Parlamento Europeo y del Consejo relativa a la eficiencia energética de edificios (refundición). Dados los nuevos objetivos y exigencias europeos, se hace necesaria la modificación y refundición de la directiva anterior. Como se dijo anteriormente, para el 2020 debe producirse una reducción del 20% del consumo de energía y de emisiones de gases efecto invernadero y que un 20% de ésta energía sea procedente de fuentes energéticas renovables.

La energía que consumen los edificios en la Unión Europea supone el 40% del consumo total de energía. Además, éste sector sigue expandiéndose, por lo que su correspondiente consumo seguirá aumentando. Es por eso que si se reduce la energía consumida por los edificios y se introduce el uso de energías que proceden de fuentes renovables en éstos, supondrá una mejora relevante en el camino hacia cumplir los objetivos de reducción de emisiones de gases efecto invernadero y de disminución de la dependencia energética de la Unión con respecto a combustibles fósiles.

Es importante recalcar que las medidas que se adopten no sólo permiten alcanzar los objetivos marcados para los países miembros en 2020, sino que también poseen un papel decisivo en el fomento de la seguridad de abastecimiento energético y del desarrollo tecnológico, haciendo posible la generación de empleo y el desarrollo regional.

Con la directiva 2010/31/UE se da respuesta a la necesidad de acciones más específicas para el aprovechamiento del potencial que poseen los edificios en cuanto a ahorro de energía y para la reducción de las diferencias existentes entre los Estados miembros en este sector.

Se pueden recopilar los requerimientos de esta directiva en las siguientes líneas:

1. Establecimiento de unos requisitos mínimos en cuanto a eficiencia energética en edificios de nueva construcción así como en edificios ya existentes y su aplicación

La metodología empleada para el cálculo de eficiencia en el edificio puede variar entre naciones y regiones. Ésta debe cubrir los resultados de eficiencia de todo un año, no sólo de las estaciones en las que es necesario el uso de refrigeración o calefacción. En su cálculo, deben incluirse factores como la utilización de energía que procede de fuentes renovables, sistemas de calefacción y refrigeración, la adecuada iluminación natural y calidad del aire interior y el diseño del edificio y se deben tener en cuenta las normas europeas en vigor.

Los Estados miembros de la Unión Europea son los responsables exclusivos de establecer requisitos mínimos de dicha eficiencia energética de los edificios y de sus elementos, teniendo en cuenta las condiciones climáticas y las peculiaridades de cada localidad. Estos requisitos deben ser sostenibles y rentables, lo que significa que debe alcanzarse un equilibrio óptimo entre lo que se invierte y el ahorro energético que se produce durante el ciclo de vida del edificio. Estos requerimientos suponen un indicador mínimo pero no máximo. Esto quiere decir que los países miembros pueden establecer unos mínimos que sean más eficientes energéticamente que los niveles considerados óptimos en cuanto a eficiencia de energía. Es necesaria una revisión periódica de estos mínimos para seguir progresando técnicamente.

La aplicación de estas condiciones mínimas de eficiencia energética de los edificios se realiza tanto a edificios nuevos o nuevas unidades de éstos como a edificios ya existentes objeto de reformas relevantes o elementos de éstos cuando se instalen o se mejoren.

2. Creación de un marco común general de una metodología de cálculo de la eficiencia energética de edificios o unidades de éstos

La Comisión Debe establecerse un marco comparativo para el cálculo de los niveles óptimos de rentabilidad de los requerimientos mínimos de eficiencia de energía de los edificios. Los países miembros han de utilizarlo con el objeto de comparar los requisitos mínimos de eficiencia energética adoptados por cada uno de ellos. Si existen discrepancias, entre los niveles óptimos de rentabilidad calculados y las condiciones mínimas de eficiencia de energía en vigor, que superen el 15%, los Estados miembros están obligados a justificar dicha discrepancia o promover las medidas necesarias para reducirla. Además, los países deben determinar el ciclo de vida útil del edificio o de sus elementos en función de la experiencia y la práctica. Los resultados que se obtengan de esta comparación y los datos empleados para llegar a ellos han de comunicarse a la Comisión cada ciertos periodos de tiempo, de manera que ésta pueda evaluar cómo progresa cada país en su objetivo hacia unos niveles inmejorables de rentabilidad de los requisitos mínimos de eficiencia de energía en los edificios.

3. Definir planes nacionales destinados a conseguir un aumento del número de los edificios de consumo de energía casi nulo

Los Estados miembros deben asegurarse de que:

- El 31 de diciembre de 2020, como muy tarde, todos los *edificios nuevos* sean edificios de consumo de energía casi nulo, pues el sector público debe servir de ejemplo.
- A partir del 31 de diciembre de 2018, los *edificios nuevos* que estén ocupados y que sean propiedad de autoridades públicas sean edificios de consumo de energía casi nulo.

Para lograr esto, los países miembros realizarán planes nacionales con el objetivo de aumentar el número de edificios de consumo de energía casi nulo. Siguiendo el ejemplo del sector público, formularán políticas y tomarán medidas para estimular la transformación de edificios en edificios de consumo de energía casi nulo. Estos planes incluirán:

- La aplicación de la definición de edificios de consumo de energía casi nulo, la cual reflejará las condiciones nacionales, regionales o locales e incluirá un indicador de energía primaria en kWh/m<sup>2</sup> al año (basado en valores medios anuales y teniendo en cuenta la normativa europea en vigor).
- Los objetivos intermedios para lograr la mejora de la eficiencia energética de los *edificios nuevos*.
- La información sobre las medidas adoptadas para fomentar los edificios de consumo de energía casi nulo, incluyendo las exigencias sobre el uso de energía procedente de fuentes renovables en edificios nuevos y existentes.

La Comisión será informada de estos planes nacionales y los evaluará, en concreto la adecuación de las medidas y políticas adoptadas para la consecución de los objetivos impuestos en esta Directiva.

4. La certificación energética de los edificios o de sus unidades

Al posible comprador o arrendatario de un edificio se le debe proporcionar la información correcta acerca de su eficiencia energética, en el certificado de eficiencia energética. Además, este debe incluir consejos prácticos sobre cómo mejorarla. Las campañas de información pueden servir de motivación a propietarios y arrendatarios para mejorar la eficiencia energética de sus edificios o de unidades de estos. El certificado de eficiencia energética también ha de dar información sobre el impacto real de la calefacción y la refrigeración en las necesidades de energía del edificio, de su consumo de energía primaria y de sus emisiones de dióxido de carbono.

Con el objeto de aumentar la transparencia de la eficiencia energética en el mercado de la propiedad no residencial en la Unión Europea, se han de fijar unas condiciones comunes para la certificación de la eficiencia energética de los edificios no residenciales. Las autoridades públicas deben dar ejemplo y procurar aplicar las recomendaciones contenidas en los certificados de eficiencia energética.

5. La inspección periódica de las instalaciones de aire acondicionado y calefacción de edificios

La inspección periódica y mantenimiento de las instalaciones de aire acondicionado y calefacción ayudan a que éstas se ajusten a las especificaciones de los equipos, de manera que se asegure su rendimiento óptimo desde el punto de vista de la seguridad, de la energía y del medio ambiente. Conviene, además, realizar una evaluación independiente de toda la instalación de calefacción y aire acondicionado periódicamente durante su ciclo de vida y, sobre todo, antes de su sustitución o mejora.

6. Los sistemas de control independiente de los certificados de eficiencia energética y de los informes de inspección.

### 1.1.3 Normativa española

De la revisión bibliográfica se ha llegado a la conclusión de que, el carácter novedoso del tema de herramientas informáticas corregidas o calibradas mediante datos medidos para la estimación de ahorros energéticos en edificios terciarios, hace que no existe un cuerpo doctrinal suficiente como para generar una normativa.

Sin embargo, existen herramientas informáticas para evaluación del comportamiento térmico de edificios si existen en normativas nacionales y europeas. En el proyecto ENCERTICUS (Energy Certification, Technology, Information and Communication for User Satisfaction), cofinanciado con fondos para el desarrollo europeo regional (ERDF) de la comisión Europea a partir del programa MED, se ha generado la siguiente tabla:

Country	Type of Building	Name of the Tool	Type of Procedure		Type of Use of the Building			
			Detailed	Simplified	Dwellings	SM Tertiary	Large Tertiary	Public
Spain	New	CALENER-VYP	X		X	X		X
		CALENER-GT	X				X	X
		CE2		X	X	X		X
		CES		X	X	X		X
			CERMA		X	X	X	X
	Existing	CALENER-VYP	X		X	X		X
		CALENER-GT	X				X	X
		CE3		X	X	X	X	X
		CEX		X	X	X		X
France	New	Comfie-DPE	X		X	X	X	
		DEL6-DPE	X		X	X	X	
		3CL-DPE		X	X	X	X	
		3F		X				X
	Existing	Comfie-DPE	X		X	X	X	
		DEL6-DPE	X		X	X	X	
		3CL-DPE		X	X	X	X	
		3F		X				X
Italy	New	Project Calculated Method		X				
	Existing	1st approach	X		X	X	X	X
		DOCET		X	X <sup>5</sup>	X <sup>6</sup>		X <sup>1</sup>
		3rd approach		X	X <sup>6</sup>	X <sup>7</sup>	X	X <sup>2</sup>
Greece	New/Existing	TEE/KENAK Spreadsheet		X <sup>7</sup>	X	X	X	X
				X	X			X
Portugal	New/Existing	Software packages	X		X			X
		Software LNEG	X			X		X
		Commercial software tools <sup>8</sup>	X				X	X

Tabla 1. Herramientas desarrolladas para verificación de estándares energéticas en EU

En ella se muestran las herramientas desarrolladas por los países miembros de la zona mediterránea con objeto de verificar el cumplimiento de sus estándares, es decir, de la transposición de la directiva europea EPBD (“Transposition of the 2002/91/EC and 2010/31/EU”).

La EPBD es un instrumento jurídico que promueve un consumo eficiente de la energía en el sector de la edificación a nivel europeo, combinando instrumentos de carácter preceptivo (obliga a los Estados miembros a establecer requisitos de eficiencia energética para los edificios nuevos y existentes que sean objeto de reforma) e instrumentos de carácter informativo (tales como la emisión de certificados de eficiencia energética en el momento de la compra-venta o alquiler y los requisitos para las inspecciones de los sistemas de

calefacción y aire acondicionado). En ella no se fijan de modo horizontal los niveles aplicables en todos los Estados miembros de la UE, sino que exige que cada uno de ellos incorpore la Directiva como legislación propia, determinando los requisitos y sistemáticas necesarios con carácter nacional. Es decir, obliga a los Estados miembros a establecer requisitos mínimos de eficiencia energética en los edificios y sus instalaciones, pero son los propios Estados miembros los que deciden cuáles son así como las metodologías de cálculo a aplicar. Por todo ello, la Comisión Europea publicó la Directiva 2002/91/CE del Parlamento Europeo y del Consejo del 16 de diciembre de 2002 relativa a la Eficiencia Energética de los Edificios (“Energy Performance Building Directive EPBD”) refundida en la Directiva 2010/31/UE del 19 de Mayo de 2010 en la que se obliga a los países de Europa a cumplir con una serie de requisitos mínimos de eficiencia energética en los edificios y sus instalaciones.

En España la transposición de la EPBD es responsabilidad del Ministerio de Industria, Energía y Turismo y del Ministerio de obras Públicas y transporte. Desde su publicación, España ha trabajado en modificar sus leyes para transponer las directrices fijadas. La transposición de la directiva se ha plasmado en la publicación de los siguientes documentos oficiales:

- Código Técnico de la Edificación (CTE) aprobado por el Real Decreto 314/2006 del 17 de marzo, y modificado en el Real Decreto 238/2013 del 13 de abril. Este documento establece los requerimientos mínimo que deben tener los nuevos edificios (residencial, no residenciales, públicos y edificios privados), así como los edificios existentes que lleven a cabo una rehabilitación de más de un 25% de su superficie.
- El procedimiento de certificación energética de edificios aprobado por el Real Decreto 47/2007 del 19 de Enero; y modificado por el Real Decreto 235/2013 del 13 de Abril para tener en cuenta la certificación energética de los edificios existentes y la actualización de la directiva Europea “2010/31/EU Directive (recast of the EPBD)”.
- El Reglamento de Instalaciones Térmicas en Edificios inicialmente aprobado por el Real Decreto 1027/2007 de 20 de Julio, y modificado por el Real Decreto 1826/2009 del 27 de Noviembre para definir las exigencias de las inspecciones periódicas de la eficiencia energética de las instalaciones térmicas de los edificios.

En paralelo se está desarrollando el libro de ruta para que se consigan los objetivos establecidos en el recast EPBD “2010/31/EU Directive (recast of the EPBD)”. Estos objetivos están dirigidos a que los nuevos edificios que se construyan a partir de 2020 sean de energía casi nula (Nearly Zero-Energy Buildings NZEB). Actualmente se ha enviado el análisis de coste óptimo exigido en el recast de la EPBD a la comisión.

Hay que mencionar que los organismos autonómicos pueden endurecer las normativas nacionales. No obstante la segunda modificación de los requerimientos tendrá lugar en 2016 con la imposición de tres nuevos Reales Decretos.

#### **1.1.4 Retos y visión de futuro**

El eslogan de ASHRAE para la mejora energética de edificios existentes: “Reconstruir energéticamente los edificios”; reconoce que la eficiencia energética de los edificios existentes, es una fantástica oportunidad de seguir caminando hacia un futuro más sostenible. En 1987 La comisión de las Naciones Unidas dijo que: “Todo aquel desarrollo que tenga en cuenta las necesidades del presente sin comprometer las capacidades de las generaciones futuras, tiene en cuenta nuestras propias necesidades”.

Bajo este eslogan, en la misma referencia, dan los siguientes números que conviene recordar, por ser valores reales de la situación actual: Edificios residenciales y comerciales suponen alrededor del 40% de la energía primaria consumida. También representan el 72% de toda la energía eléctrica producida, y el 55% de la demanda de gas natural. Más importante, son responsables de un tercio del total de emisiones mundiales de CO<sub>2</sub>.

El 70% del parque edificatorio existente hoy, existirá en 2030; si además solo el 2% de los proyectos en obra civil se destinan a edificios nuevos, se puede afirmar que la rehabilitación energética es necesaria.

En primer lugar cabe destacar el acuerdo al que ha llegado España y los demás países de la Unión Europea en la Directiva 2006/32/CE sobre la eficiencia del uso final de la energía y los servicios energéticos. En dicha

Directiva se fija un marco de esfuerzo común para conseguir un ahorro energético de un 9% en el año 2016 y se establece un marco apropiado para el fomento del ahorro y la eficiencia energética a través del desarrollo de la actividad de empresas de servicios energéticos. En la Decisión del Consejo Europeo de 9 de marzo de 2007 se fija alcanzar niveles de ahorro del 20% en el horizonte 2020.

En este mismo contexto europeo, el G8 ha propuesto que para el 2050 las emisiones de CO2 se reduzcan en un 50% respecto de los niveles de 2005, lo que se estima que requiera una inversión del orden de 29 billones de euros.

La Agencia Internacional de la Energía (IEA), por su parte, establece en este escenario que hasta un 36% de esta reducción se conseguiría con la mejora de la eficiencia en el uso de la energía, por delante del 24% asociado a la eficiencia en la generación, el 21% relativo al uso de energías renovables y el 19% mediante captura de CO2. En términos anuales, entre 2005 y 2050 sería necesaria una mejora sostenida de la eficiencia energética del 1,7% anual para alcanzar dicho objetivo (Perspectivas sobre tecnología energética, AIE, septiembre de 2008).

También cabe mencionar el Plan 20/20/20 de la Comisión Europea, encaminado a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero en un 20%, fortalecer el papel de las energías renovables para que cubran un 20% del consumo energético total de la Unión Europea, y ahorrar un 20% del consumo de energía por mejoras en la eficiencia energética en edificios, industria y transporte, todo ello en el horizonte del año 2020.

Por último la Directiva 2010/31/UE fija unos requisitos mínimos para los edificios existentes, cuando éstos sean objeto de trabajos de renovación importantes.

Para cumplir con estos compromisos, la administración española ha estado desarrollando a lo largo de estos últimos años una serie de medidas que se ponen de manifiesto porque van a ser continuadas en los próximos años con mayor intensidad.

- A nivel nacional nos encontramos con el Real Decreto-ley 6/2010, de medidas para el impulso de la recuperación económica y de empleo que incluye, en el ámbito energético medidas para impulsar las ESE.
- También hay que citar el Proyecto de Ley de Economía Sostenible que, en el artículo 33 establece que las empresas públicas adaptarán sus planes estratégicos para optimizar el consumo energético de sus instalaciones mediante la celebración de contratos de servicios energéticos.
- La Administración General del Estado ha incentivado a lo largo de estos últimos años fomentando el crecimiento de las ESE a través del marco Estrategia de Ahorro y Eficiencia Energética de España 2004 – 2012 (E4), donde además de establecer una serie de objetivos de ahorro de energía, contemplaba entre sus actuaciones potenciar la profesionalización y existencia de empresas que presten servicios energéticos basados en la eficiencia energética.
- Asimismo, el Plan de Activación del Ahorro y la Eficiencia Energética 2008 – 2011 que refuerza el E4, engloba 31 medidas en cuatro líneas de actuación con el objetivo de reducir el consumo de energía. Entre las medidas, destaca la medida de impulso al desarrollo de empresas de servicios energéticos, mediante la definición de la figura de la ESE y con el establecimiento de una línea de financiación para este tipo de proyectos.
- También hay que señalar el Plan de Activación de la eficiencia energética en los edificios de la Administración General del Estado (AGE), que tiene por objeto que 330 centros consumidores de energía, entendiendo éstos como edificio o agrupación de edificios con una superficie total superior a 30.000 m<sup>2</sup> y una facturación energética y de mantenimiento de la instalaciones superior a 400.000 €/año, reduzcan su consumo un 20% de energía en el año 2016.

La conclusión es que para poder cumplir con los objetivos acordados hay que pasar y así la administración está apostando por reformar energéticamente el parque edificatorio existente.

Hay que añadir que se trata de una incidencia a largo plazo, pues el producto en cuestión presenta una gran durabilidad. De hecho, se estima que, sólo en Europa, los edificios actualmente existentes consumirán en el año 2050 alrededor de los dos tercios de todo lo que consumirá el sector de la edificación.

El objetivo de la Unión Europea de reducir el consumo de energía en un 20% para 2020 (EPBD – Directiva Europea) requiere una significativa inversión en eficiencia energética, sobre todo en los próximos años, que además de significativa tiene que ser ágil. Por estos motivos, el crecimiento de las compañías de servicios

energéticos en edificios jugará un papel fundamental, al favorecer la competencia de entidades privadas en el aumento de la eficiencia energética, no por obligatoriedad sino por el ahorro energético en sí mismo y el beneficio económico asociado, lo que ayudará a alcanzar la meta del 20% comunitario.

En vistas de la necesidad de estas empresas, los mercados de financiación para Contratos de Mejora Energética (EPC) y de Gestión Energéticas (CEM) están creciendo. Unido a esto, se ha incrementado el número de cuerpos de la administración pública que demandan contratos con las llamadas empresas de servicios energéticos (ESE) para auditar, gestionar y mantener sus propios edificios. Esta situación se traduce no solo en un cambio de legislación sino de financiación. Centrando el análisis en la situación de España, la Comisión Europea proporciona los siguientes datos:

- No ha habido cambios significativos en los años recientes en lo que se refiere a la actividad de empresas ESCO.
- Destacan compañías de energía y de construcción, además de empresas multiservicios. Lo que más abunda son las empresas públicas que actúan como agencias de la energía.
- Existe un buen mercado para este tipo de empresas, que hasta la fecha solo ha sido capaz de funcionar a través de subvenciones o intervenciones públicas.

A nivel normativo y de áreas de investigación, destacamos las siguientes:

- Eficiencia Energética en Edificios

La transición a España del “Action Plan for Energy Efficiency” de la Unión Europea se materializa en El Plan de Acción, para el periodo 2011–2020, de la Estrategia de Ahorro y Eficiencia Energética en España 2011–2020 (PAEE 2011-2020), aprobado en el Consejo de Ministros del 29 de julio de 2011, y da cumplimiento a lo exigido por la Directiva 2006/32/CE, del Parlamento Europeo y del Consejo, de 5 de abril de 2006, sobre la eficiencia del uso final de la energía y los servicios energéticos (Diario Oficial de la UE, 27.4.2006).

El Plan de Acción propone medidas a varios niveles sobre el sector de los edificios existentes, entre las que se destacan:

- Rehabilitación de la envolvente térmica de los edificios existentes, incluyendo sistemas convencionales y sistemas pasivos (para calefacción y refrigeración).
- Mejora de la eficiencia energética de las instalaciones térmicas y eléctricas de los edificios existentes mediante la sustitución de los equipos y la mejora del funcionamiento de las instalaciones implantando sistemas de monitorización y control de la energía.

Los sistemas inteligentes de monitorización y control de energía también contribuirán a una mejora de la seguridad y a un mejor aprovechamiento y del mantenimiento de las instalaciones. Estos sistemas (incluyendo contadores inteligentes y sistemas de visualización avanzada) recogen, de manera continua, datos de lo que está ocurriendo en el edificio y de cómo están operando sus instalaciones, alimentando a un sistema de control que optimiza el consumo energético.

El Plan de Acción 2011-2020 presenta un conjunto de medidas y actuaciones coherente con los escenarios de consumo de energía final y primaria incorporados en otros instrumentos de planificación en materia de energías renovables (de acuerdo con las obligaciones que se derivan de la Directiva 2009/28/CE, de 23 de abril de 2009, relativa al fomento del uso de energía procedente de fuentes renovables) y de planificación de los sectores de electricidad y gas. De esta forma, la planificación en materia energética constituye un conjunto coherente, conducente al objetivo de mejora de la intensidad final del 2% interanual en el período 2010-2020.

El escenario considerado como objetivo de este Plan y escenario, por tanto, de eficiencia, presenta un consumo-objetivo de energía primaria de 142.213 ktep en 2020, lo que supone un incremento interanual del 0,8% desde el año 2010 y una mejora de la intensidad primaria del 1,5% anual entre ambos años.

En términos de energía final, con un objetivo de consumo en el año 2020 de 102.220 ktep, de los que, descontados los consumos de energía final con fines no energéticos, se obtiene un total de consumo de 95.355 ktep. Este escenario garantiza el cumplimiento del objetivo de mejora de la intensidad final del 2% interanual establecido en las planificaciones aprobadas con carácter previo a este Plan de Acción 2011-2020, y para hacer posible la mejora de la eficiencia propuesta se han identificado las medidas de ahorro y eficiencia

energética contenidas en el mismo.

A continuación se destacan los principales programas vigentes para la mejora y rehabilitación energética de edificios:

1. Iniciativas de IDAE:
  - Fondo JESSICA-F.I.D.A.E. Fondo de Inversión para financiar proyectos de eficiencia energética y energías renovables.
  - Programa PAREER. Programa de Ayudas para la Rehabilitación Energética de Edificios existentes del sector Residencial (uso vivienda y hotelero).
  - Programa Biomcasa II. El objetivo del nuevo programa BIOMCASA II es continuar facilitando la promoción y la financiación de los proyectos de biomasa térmica en edificios en España.
2. El Ministerio de Fomento financia 4 programas de ayuda para la rehabilitación en el marco del Plan Estatal 2013-2016. Este plan quiere fomentar la **rehabilitación de edificios** y la regeneración y renovación urbanas para mejorar la calidad de la vivienda, así como la eficiencia energética de edificios y ciudades para una mayor calidad de vida y ahorro energético, apostando por una economía de bajo consumo y en el cumplimiento de la Estrategia europea 2020:
  - Programa de fomento de la rehabilitación edificatoria
  - Programa de fomento de la regeneración y renovación urbanas
  - Programa de apoyo a la implantación del Informe de evaluación de los edificios
  - Programa para el fomento de ciudades sostenibles y competitivas
3. El Plan Andaluz de Vivienda y Rehabilitación sustituirá al Plan Concertado de Vivienda y Suelo 2008-2012 , vigente en la actualidad, y que contempla los siguientes programas:
  - Transformación de infravivienda.
  - Rehabilitación autonómica.
  - Rehabilitación individualizada de viviendas.
  - Rehabilitación de edificios.
  - Rehabilitación singular.
  - Mejora de la eficiencia energética de viviendas y edificios existentes. RENOVE.
4. Iniciativas Europeas.
  - La última iniciativa impulsada por Europa para la rehabilitación energética del parque inmobiliario europeo es “Renovate Europe”, un programa de eficiencia energética en edificios que en España busca reducir el 80% del consumo energético para 2050 (comparado con los niveles de 2005) y que podría crear hasta 212.300 puestos de trabajo en 2020.
  - Programa Horizonte 2020: Es el programa que financia proyectos de investigación e innovación de diversas áreas temáticas en el contexto europeo, contando con casi 80.000M€ para el periodo 2014-2020.
  - Dentro del VII Programa Marco de la UE, se propone el programa Intelligent Energy –Europe y, formando parte de él, el programa SAVE con el objetivo de mejorar la eficiencia energética y el uso racional de la energía en edificios y en otros sectores industriales.

- También dentro del Programa Marco, en el apartado de ICT (Information and Communication Technologies), el tema 4 del Programa de Trabajo se refiere a “ICT for Energy Efficiency and Environment”.
- También de la Unión Europea destacamos las JTI (Joint Technology Initiatives). Usando este instrumento numerosos proyectos han sido financiados en temas similares dentro de ARTEMISIA, y una nueva JTI en el sector de la Edificación se encuentra actualmente en constitución.

Todas estas vías de subvención pueden suponer un impulso económico a la red empresarial ligada a la energética edificatoria, pero el elemento más importante de cara al futuro son las modificaciones de los reglamentos actuales en los próximos años. Esto último aparece detallado en el punto “Normativa nacional y Europea” de donde se destacan dos datos relevantes y vinculados con la transposición de la directiva europea EPBD “2010/31/EU Directive (recast of the EPBD)”:

1. El endurecimiento previsto de las normativas españolas CTE, RITE y procedimientos de certificación en 2016. Este endurecimiento quedará vinculado a edificios de nueva planta y edificios existentes en los que se realicen reformas. No obstante, estas nuevas normativas fijarán nuevos escenarios de referencia para la rehabilitación energética que seguro se vincularán con los requerimientos para optar a las subvenciones comentadas anteriormente.
2. Edificios de energía casi nula (NZEB). Esta nueva tendencia despertará un interés en nuevos conceptos edificatorios, nuevas soluciones innovadores, nuevos sistemas de climatización e incluso la incorporación de tecnologías existentes pero no explotadas completamente, ya que intentar conseguir un objetivo de “balance neto cero o cuasi cero” en un edificio, requiere optimizar el edificio al máximo nivel.

## 1.2 VENTILACIÓN ACTIVA

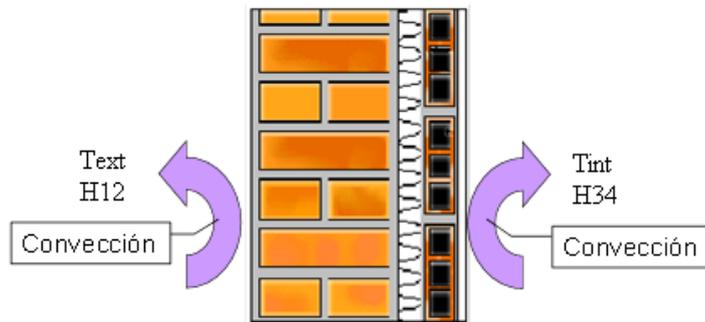


Figura 1. Transmisión de calor en un muro

Tenemos la necesidad de aprovechar la capacidad de almacenamiento de los muros. Esto se consigue haciendo incidir aire frío/caliente sobre las superficies de los edificios con inercia térmica. LTeniendo en cuenta que el calor que se podría acumular en estas superficies es función de:

- Calor por convección de la temperatura del aire con la superficie.
- Calor por radiación de la temperatura del ambiente exterior con la superficie.
- Calor por conducción de una superficie a otra, dónde se produce la acumulación de temperatura.
- Posible flujo de calor ocasionado por una fuente externa.

Llegamos al siguiente problema unidireccional homogéneo:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial^2 T(x,t)}{\partial x^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T(x,t)}{\partial t} \quad \text{en } 0 < x < L, \quad t > 0 \\ \text{Condiciones de Contorno:} \\ -K_1 \frac{\partial T}{\partial x} + h_1 T = 0 \quad x=0, \quad t > 0 \\ K_2 \frac{\partial T}{\partial x} + h_2 T = 0 \quad x=L, \quad t > 0 \\ \text{Condición Inicial:} \\ T = F(x) \quad t=0, \quad 0 \leq x \leq L \end{array} \right.$$

Resolviendo, obtenemos la solución del problema:

$$\left\{ \begin{array}{l} T(x,t) = \sum_{m=1}^{\infty} e^{-\alpha \beta_m^2 t} \frac{1}{N(\beta_m)} X(\beta_m, x) \int_0^L X(\beta_m, x') F(x') dx' \\ \text{donde} \\ F(x) = \sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{N(\beta_m)} X(\beta_m, x) \int_0^L X(\beta_m, x') F(x') dx' \\ X(\beta_m, x) = \beta_m \cos(\beta_m x) + H_1 \sin(\beta_m x) \quad \text{autovectores} \\ \beta_m \quad \text{autovalores} \\ \text{tg}(\beta_m L) = \frac{\beta_m (H_1 + H_2)}{\beta_m - H_1 H_2} \end{array} \right.$$

La cantidad de energía que puede quedar almacenada en el muro depende entonces de:

- K, Conductividad térmica, función del material.
- h, coeficiente de película, depende de la convección.
- Área+espesor, dependen de la cantidad.
- A, difusividad térmica, depende del material.

Por lo que, nos interesa incidir con un gran coeficiente de película sobre un gran área.

A continuación se describen algunas técnicas que se fundamentan en lo comentado.

### 1.2.1 Inercia térmica

La inercia térmica en el diseño y construcción de los edificios, es un recurso fundamental en zonas climáticas donde la diferencia de temperatura entre el día y la noche es elevada, para alcanzar el confort térmico de sus usuarios en el interior de los mismos. Dicha inercia se consigue mediante el empleo de materiales capaces de almacenar energía durante el día, y liberarla durante la noche. Esta medida pasiva permite ahorrar en consumo de energía en calefacción e incluso en refrigeración.



Figura 2. Importancia de la inercia térmica

La inercia térmica es un recurso utilizado en la arquitectura bioclimática. Consiste en la capacidad de determinados elementos -arquitectónicos en este caso- para almacenar calor (energía), conservarlo y liberarlo de una manera paulatina, permitiendo un menor uso de sistemas mecánicos de calefacción e incluso de refrigeración. Esto permite conseguir temperaturas estables a lo largo del día, y por tanto el confort térmico deseado. La inercia térmica depende de las características del material de dicho elemento:

- Su calor específico ( $c$ ) o capacidad para almacenar calor ( $c = J/Kg.K$ ).
- Su masa ( $Kg$ ): la capacidad calorífica ( $C$ ), mide relación entre la energía o calor transmitida a un cuerpo y la variación de temperatura que experimenta ( $C = J/K$ ). Cuanto mayor es la capacidad calorífica de un cuerpo, mayor energía hay que transmitirle para que aumente su temperatura en un grado; y cuanto mayor es su masa ( $C = c \times \text{masa } (Kg)$ ), mayor es la capacidad calorífica, y por tanto su inercia térmica.
- Su densidad ( $Kg/m^3$ ). Relaciona el volumen y la masa del elemento. A mayor densidad, mayor inercia térmica.
- Su coeficiente de conductividad térmica ( $\lambda$ ) o capacidad para conducir calor ( $W/mK$ ). Los materiales que sean buenos conductores colaboran en el aumento de la inercia térmica interior.

### 1.2.1.1 Tecnología solar pasiva para calefacción y refrigeración aprovechando la inercia

La inercia térmica de materiales utilizados en la construcción permite mantener la temperatura estable a lo largo del día, en los espacios interiores habitables. En verano, un muro másico, que presenta una gran inercia térmica, absorbe calor durante el día del ambiente interior, debido a la diferencia de temperatura entre ambos, lo va almacenando de manera progresiva, y se disipa durante la noche, con una ventilación adecuada. A la mañana siguiente, dicho muro ha reducido su temperatura, para empezar de nuevo el ciclo: absorbe calor durante el día, y lo emite durante la noche, manteniendo una temperatura constante y reduciendo la necesidad de utilizar el equipo de refrigeración.



Figura 3. Aprovechamiento del efecto solar

Durante las estaciones más frías, el funcionamiento consiste en almacenar calor durante el día, para después devolverlo al ambiente interior durante la noche cuando desciende la temperatura. Se trata de mecanismos de refrigeración y calefacción pasivos, que aprovechan la diferencia de temperatura entre el elemento constructivo y su entorno, amortiguan las diferencias térmicas, y se comportan de forma anticíclica (amortiguación y retardo).

Evidentemente, el aprovechamiento efectivo de estos sistemas implica un estudio previo del clima en el que se ubica el edificio – orientación, asoleamiento, horas de radiación, etc.-, una adecuada aplicación del mecanismo, que evite temperaturas elevadas en estancias donde no se requiere, junto con un buen sistema de ventilación, que permita enfriar la masa térmica en verano.

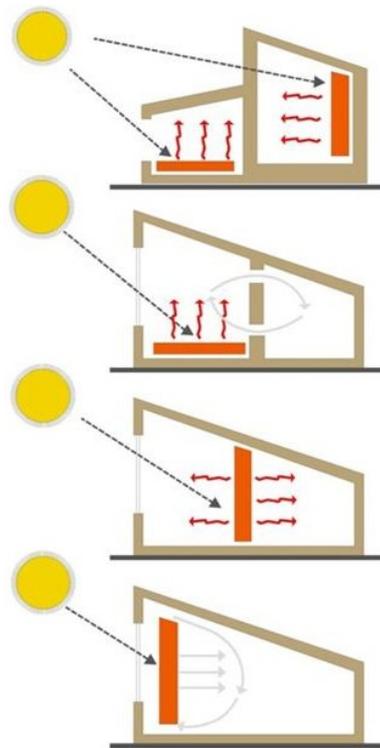


Figura 4 Lugares de colocación de la masa térmica en el edificio [3]

### 1.2.1.2 Materiales con elevada inercia térmica

El uso de medidas pasivas en la construcción, permite reducir el consumo de energía de las instalaciones térmicas por lo tanto para alcanzar el confort deseado en el interior de los edificios. Entre estas medidas, destacamos el uso de materiales con gran inercia o capacidad calorífica como el agua, el granito, la tierra seca y el adobe o el acero (capacidad calorífica entre 500 y 1000 Kcal/m<sup>3</sup>°C); para la construcción de elementos constructivos bioclimáticos.



Figura 5. Aprovechamiento material con elevada inercia térmica

Otros materiales más habituales en la construcción y que también tienen una capacidad calorífica aceptable son la madera, el ladrillo o el hormigón, por un lado (entorno a 400 Kcal/m<sup>3</sup>°C), y los aislantes térmicos (capacidad calorífica inferior a 40 Kcal/m<sup>3</sup>°C) como la lana mineral, el EPS y el poliuretano, o la celulosa que se utiliza como aislamiento térmico, por otro.

## 1.2.2 Ventilación activa

### 1.2.2.1 Night Cooling o Enfriamiento Nocturno

El enfriamiento nocturno (Night Cooling) consiste en ventilar el edificio en el periodo de desocupación para enfriarlo.

- El objetivo es enfriar la masa del edificio cuando la temperatura exterior es baja (noche). Así, la estructura del edificio se enfría durante la noche, creándose en el propio seno del edificio un sumidero de calor que estará disponible para disipar el calor generado durante el periodo de ocupación. Este sumidero, absorberá las ganancias de calor debidas a ocupación y equipos, manteniendo unas condiciones interiores aceptables. Esta técnica, bien controlada y diseñada, reduce el pico de demanda del edificio en su arranque diario o tras un periodo de desocupación en los periodos de refrigeración.
- Existe una problemática asociada a esta medida: dificultad de evaluar el ahorro obtenido, es decir, de simular/caracterizar la implementación de la misma, ya que depende fuertemente de la inercia del edificio, que como sabemos es difícil de cuantificar.
- La principal limitación de esta medida es evitar introducir en el edificio aire exterior con alta humedad (por encima del 60%) para evitar condensaciones superficiales. Esto conduce a la necesidad de medir temperatura y humedad del aire exterior; siempre que el aire exterior esté a una temperatura inferior o igual a la del interior del edificio y su humedad relativa esté por debajo del 60% se puede usar para ventilar.
- Se debe diseñar el sistema para que la distribución del aire por la zona sea la mejor posible, para favorecer que ese aire transfiera con la mayor cantidad de masa posible.
- El parámetro más importante en el proceso, es el gasto asociado al funcionamiento del sistema ventilación, es decir, hay que tener en cuenta que durante el enfriamiento nocturno se tiene un consumo de ventilación, lo que hace que las horas de funcionamiento de esta medida deban estar controladas. En este caso, el ahorro al no ser cuantificable con exactitud, la valoración consumo-ahorro es imposible. Todo lo que sea ventilar aire cuando cumpla esas restricciones es beneficioso, por lo que se proponen dos alternativas: A) durante el periodo de refrigeración establecer unas horas de funcionamiento constantes para el modo de ventilación nocturna (ej. 2 horas antes del periodo de ocupación); B) “decisión a pie de campo”, instalar el sistema y ponerlo a funcionar evaluando el consumo que produce, antes de instalarlo y al instalarlo, variando las horas de funcionamiento del mismo hasta el momento que interese (esta opción, se engloba dentro del marco de gestión y dirección energética de edificios, y requiere la medición de consumos).

#### 1.2.2.2 PHDC

PHDC, es un proyecto internacional, creado con el objetivo de promover el uso de sistemas de refrigeración Pasivos e Híbridos en los edificios entre profesionales de diseño, constructores, propietarios y usuarios.

PHDC supone una alternativa energética, rentable y ecológica para edificios nuevos y existentes. Lo que, en el contexto actual del cambio exigido a los sistemas de refrigeración convencionales, representa una enorme oportunidad para la reducción del consumo energético y de las emisiones.

La fuerza promotora del tiro térmico invertido, capaz de difundir el aire por el edificio y servir de fuente de refrigeración es el enfriamiento del aire (menor temperatura y más húmedo); crea un aumento de su densidad. La fuente de aire frío puede ser activa o pasiva.

Pasivo. Se consigue mediante la evaporación directa. En climas secos, como los del sur de Europa, en una operación continua se puede cubrir entre el 25 y el 85% de la carga de refrigeración de edificios terciarios (lo que supone 15 – 60 kWh/m<sup>2</sup>). En edificios residenciales puede reducir la carga por debajo de 15 kWh/m<sup>2</sup> (Estándar de Passive House). Amplia información sobre este tipo de sistemas aparece en el proyecto PDEC (Passive Draught Evaporative Cooling) (Passiv Haus Institut, 2012)

Activo. Condiciones climáticas calientes pero húmedas, requieren el uso de sistemas activos, en los que el enfriamiento es indirecto por medio de un intercambiador de calor, es decir, se usa un fluido intermedio agua/aire para enfriar la corriente de aire a introducir en el edificio. Aun con el empleo de ventilación mecánica, se consiguen ahorros del consumo eléctrico del 25-35 % (edificios terciarios).

Híbrido. Es la combinación de las dos técnicas comentadas. El sistema se adaptaría a diferentes condiciones climáticas (secas y húmedas); lo cual aumenta la aplicabilidad, referida a la idoneidad de regiones climáticas, como al aumento de horas de funcionamiento.

### 1.2.2.3 Free Cooling

Se trata de un sistema de reducción del consumo energético para enfriamiento gratuito del local a acondicionar que toma el aire exterior para aprovechar su baja entalpía cuando las condiciones exteriores son favorables, lo cual disminuye el uso de los equipos de aire acondicionado.

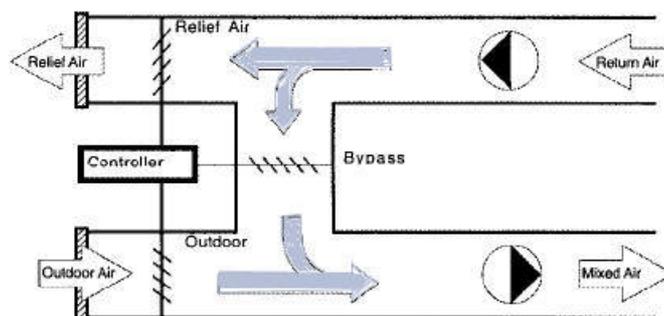


Figura 6. Esquema de funcionamiento del free-cooling

En la Figura 6, se detalla el procedimiento usual para realizar el free-cooling; este sistema cuenta con un ventilador en la línea de retorno que conduce el aire hacia el exterior o recirculándolo hacia la unidad de tratamiento de aire.

La regulación de la proporción de aire eliminado o recirculado se efectúa mediante un juego de lamas en función del grado de apertura o cierre y una tercera lama en la toma de aire exterior que opera sincronizadamente con el aire eliminado al exterior; así al aumentar el caudal de aire exterior a medida que se abre, se va cerrando la del aire recirculado y se abre la del aire expulsado.

## 1.3 ESTADO DEL ARTE

En este apartado se muestran informes que se pueden relacionar y comparar con los temas comentados en este trabajo.

### 1.3.1 Análisis con CFD de la ventilación en edificios con posiciones de apertura [4], [5]

La posición de las aberturas de las ventanas y la inclinación del techo son parámetros importantes que determinan la eficacia del viento impulsado por ventilación cruzada en edificios. Muchos estudios sobre la ventilación natural se han realizado en el pasado, sin embargo, una revisión detallada de la literatura indica que la mayoría de los estudios se centraron en techos planos con posiciones de apertura simétrica. Hay una falta de investigación que analiza el impacto de las posiciones de apertura y la inclinación del techo en el potencial de ventilación natural. Este artículo presenta simulaciones CFD para analizar el flujo natural de ventilación en un edificio aislado genérico con distintas posiciones de la abertura y cinco diferentes ángulos de inclinación del techo. Las simulaciones se realizan utilizando Navier Stokes y Reynolds. Se basan en un análisis de sensibilidad y en la validación con las mediciones de un túnel de viento anteriormente publicado. Se muestra que el ángulo de inclinación del tejado tiene un efecto significativo en el flujo de ventilación, se aproxima un aumento de la tarifa en más del 22%. La velocidad del aire máxima aumenta considerablemente cuando se aumenta el ángulo de inclinación, sin embargo, las diferencias de la velocidad promedio en las zonas ocupadas son solo alrededor del 7%. La posición vertical de la abertura de salida tiene un impacto relativamente pequeño sobre la tasa de flujo de volumen (menos de 4%) y una pequeña influencia en la velocidad promedio en la zona ocupada (<5%).

### 1.3.1.1 Introducción

Un techo de diente de sierra en los edificios puede contribuir a un ambiente interior saludable, ya que permite una mejor combinación de la luz del día y la ventilación natural en comparación con un techo estándar. Estos techos tienen aberturas de nivel inferior en el barlovento y de nivel superior en el sotavento. El uso de las aberturas de nivel superior ubicadas cerca del techo, hace que se puedan alcanzar niveles de intensidad de la luz superiores que los niveles obtenidos en una abertura en el centro o parte inferior de una fachada. [6]

### 1.3.1.2 Simulación CFD: Configuraciones y parámetros

Estos ajustes y parámetros también serán utilizados para el análisis de sensibilidad (resolución de la cuadrilla, turbulencia del modelo, entrada de la energía cinética turbulenta).

La siguiente figura muestra la vista frontal de un edificio a escala reducida, estudiado por [7] con el tamaño y las dimensiones en metros.

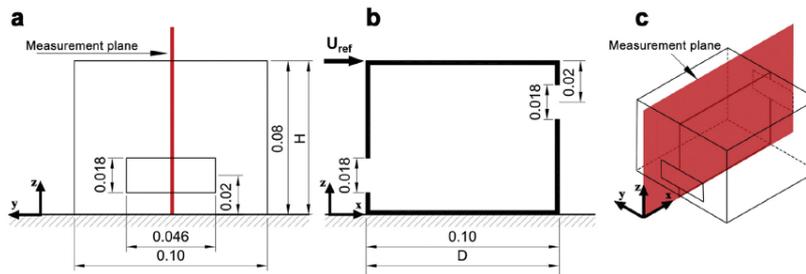


Figura 7. Vista edificio estudiado

### 1.3.1.3 Solucionador de problemas

El código de CFD ANSYS es utilizado para realizar simulaciones. La constante Reynolds promedia 3D (ecuaciones de Navier Stokes) se resuelven en combinación con el modelo k-u. El algoritmo simple es utilizado para el acoplamiento de la velocidad y la presión. La convergencia se supone que se obtiene cuando todos los residuos se estabilizan y se alcanza un mínimo de  $10^{-6}$  para x e y, de  $10^{-5}$  para z, y de  $10^{-4}$  para k y  $\epsilon$ . Serán necesarias más de 10400 iteraciones para obtener una solución fiable.

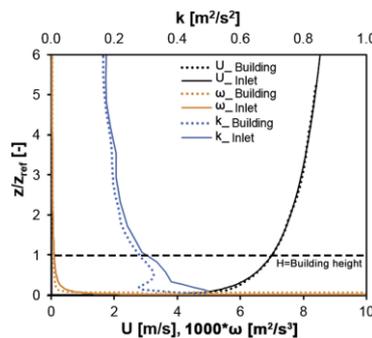


Figura 8. Análisis homogeneidad horizontal

La anterior imagen muestra un análisis de homogeneidad horizontal: perfiles de la velocidad media del viento (U), energía cinética turbulenta (k) y la tasa de disipación específica (u) en la entrada (líneas continuas) y en la posición del edificio (líneas de puntos). La altura del modelo es 0,08 m.

### 1.3.1.4 Impacto de la resolución

Al realizar un análisis de sensibilidad es importante reducir los errores de discretización y el tiempo de cálculo. En este caso, se realizó un análisis basado en tres redes: (1) una malla gruesa con 421,088 células; (2) una red básica con 770,540 células (caso de referencia); y (3) una última cuadrícula con 1,607,572 células.

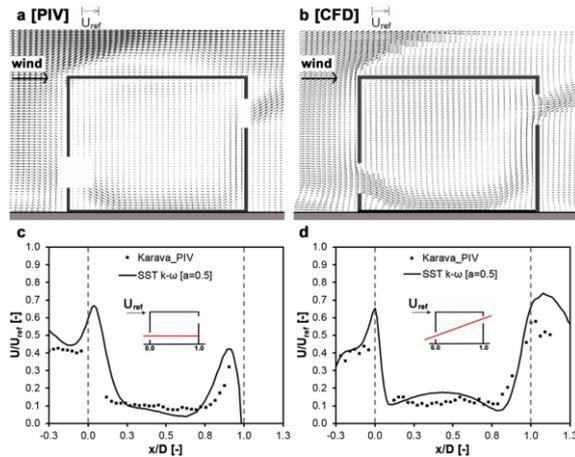


Figura 9. Comparación de la velocidad media en el plano vertical, a partir de PIV y CFD

### 1.3.1.5 Impacto del modelo turbulento

La validación del modelo de turbulencia es fundamental para la fiabilidad de las simulaciones CFD. Las simulaciones 3D RANS son llevadas a cabo en combinación con seis modelos de turbulencia.

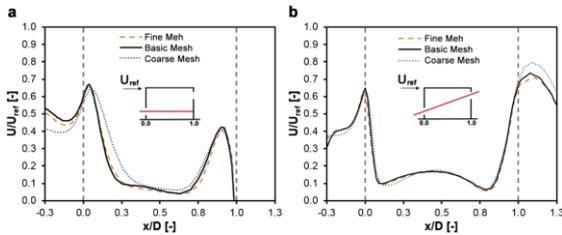


Figura 10. Impacto de la resolución de la cuadrilla

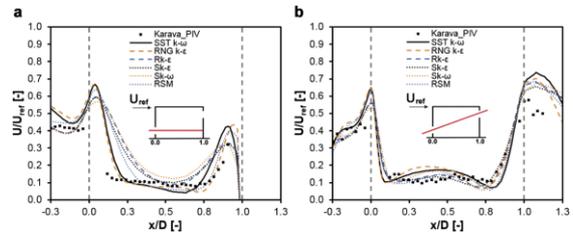


Figura 11. Impacto del modelo de turbulencia. Comparación entre PIV y CFD

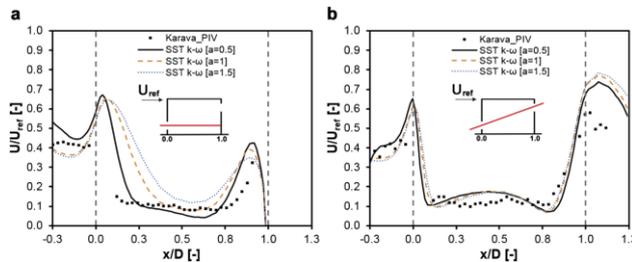


Figura 12. Influencia de la energía cinética turbulenta

## 1.3.2 Actuación del night cooling en el diseño de habitaciones basado en CFD [8], [9]

Especialmente en oficinas, night cooling atrae un interés que está en constante crecimiento. Desafortunadamente, el diseño de las construcciones tradicionales muestra considerables problemas con el calor por convección que se transfiere por las noches a través de sus paredes. Este artículo muestra un procedimiento de optimización de un modelo basado en encontrar soluciones de diseño de habitación/sistema que transfieran un alto flujo de calor por convección durante el enfriamiento de la noche en una oficina genérica. Estos modelos muestran cómo el flujo de calor por convección en la noche está relacionado con el concepto de ventilación, la masa térmica, la geometría y la fuerza impulsora. En realidad, estos modelos básicamente buscan el muestreo de datos para elegir el óptimo global.

### 1.3.2.1 Introducción

Un creciente interés radica en las técnicas de enfriamiento pasivo, sobretodo enfriamiento nocturno. Después de todo, el enfriamiento nocturno mejora el confort de verano y minimiza la necesidad de refrigeración mecánica. Por la noche, se enfría la estructura del edificio. Los días siguientes, la masa térmica absorbe el

calor, por lo que el pico de las temperaturas se reducen y atrasan. [10]. Para un rendimiento óptimo, tres elementos básicos son necesarios: el suministro de aire, la capacidad de almacenar calor y la transferencia de calor, especialmente la transferencia de calor por convección durante la noche juega un papel clave. Desafortunadamente, herramientas de diseño habituales hoy en día no pueden captar este caso específico. La creación de nuevos experimentos costosos a partir de correlaciones de transferencia no es factible para los diseñadores. La implementación en CFD para investigar la transferencia del calor convectivo puede proporcionar nuevos conocimientos y podría inspirar a nuevos estudios.

### 1.3.2.2 Configuración del experimento de simulación

Las oficinas abiertas suelen tener una sección longitudinal grande en comparación con el corte transversal y con frecuencia tienen difusores en forma de ventanas. Esto conduce, en términos generales, al flujo de aire 2D, de hecho influenciado por remolinos 3D. Así, no es una mala opción limitar el problema a un caso 2D. Este caso de prueba era básicamente una habitación ventilada con apertura a cada lado. El suministro de aire del lado izquierdo era bastante alto. Sin embargo, esta simple descripción condujo a un gran desarrollo del aire entre las dos paredes, que no apareció tan acentuado en las simulaciones, requería un modelo de aproximación y un bajo número de puntos cerca de la abertura [11]

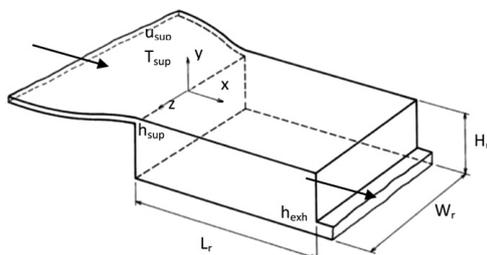


Figura 13. Experimento nombrado

### 1.3.2.3 Resultados

Para garantizar la fiabilidad de los resultados de la simulación, la validación del modelo de simulación era esencial. Sin embargo, no hubo datos disponibles para el caso. Afortunadamente, los datos experimentales del 2D se pueden utilizar. La altura de la sala más grande y un flujo de calor constante en vez de una temperatura fija no plantean ningún problema. Este caso pretende ser un punto de referencia para la convección mixta. Elevar el flujo de calor constante añadido por el suelo permitió determinar que Richardson se desvió en el número de chorros del techo. Las visualizaciones de humo de Schwenke [12] indicaron que el avión cayó inmediatamente hacia abajo cuando  $Ri$  excedió 0,02. Probablemente, esto dio como resultado el uso de rejillas, las funciones de pared y modelos simples de turbulencia. Sin embargo, estas opciones fueron lo mejor que podían conseguir.

### 1.3.3 Efecto de la refrigeración en la noche en la productividad y bioquímica [13]

Se ha estudiado el efecto del enfriamiento en la noche en la productividad y composición bioquímica de la tetraselmis suecica cultivada. La hipótesis de que el enfriamiento por la noche disminuiría la tasa de respiración y por tanto mejoraría la productividad fue rechazada. La productividad tras un período de 24 horas y la composición bioquímica sólo estaban influenciadas por la entrada de luz diurna. La cantidad de carbohidratos superior y menor contenido de proteína se observó en los períodos con más luz. Los hidratos de carbono producidos durante el día se utilizaron para la síntesis de proteínas en la noche, mientras que el contenido ácido graso se mantuvo constante durante el día. La tasa de pérdida de carbohidratos en la noche se relaciona linealmente con la tasa de crecimiento específico, por lo tanto con la historia de la luz de las microalgas.

#### 1.3.3.1 Introducción

La microalga marina es una materia prima valiosa en la acuicultura, que se utiliza para la alimentación directa para marisco o indirecta como pienso para algunas larvas de peces a través de criaderos. Esta microalga puede ser cultivada mejor en condiciones controladas en fotobiorreactores cerrados (PBR). Esto asegura una alta

productividad constant y alta calidad de la materia prima. Especialmente en las etapas post-larvas de moluscos, crustáceos y peces de alta calidad se necesitan algas. Cuando se colocan al aire libre de las condiciones de luz en el PBR no son constants y pueden cambiar a lo largo del día. Durante el día, el CO<sup>2</sup> de la luz es capturado y la fotosíntesis se está llevando a cabo, mientras que los carbohidratos formados son en parte utilizados en el proceso de respiración. Debido a que predomina la fotosíntesis más que la respiración durante el día, un aumento neto de la biomasa se observará durante días. Durante la noche la fotosíntesis ya no es posible y la respiración prevalece. Esto resultará en pérdidas de biomasa durante la noche, las células de microalgas metabolizan los hidratos de carbon para fines de mantenimiento y para la síntesis de proteínas y otros compuestos celulares. La productividad neta es, pues, el resultado de la fotosíntesis y la respiración.

### 1.3.3.2 Fotobioreactor tubular y modo de funcionamiento

El experiment fue llevado a cabo en un PBR tubular horizontal en un invernadero situado en Vlissingen, Países Bajos [13]. El efecto de enfriamiento en la noche que afecta en la productividad, la tasa de pérdida de biomasa y composición bioquímica se estudió a tres temperaturas nocturnas diferentes, 10, 15 y 20°C, manteniendo la temperatura durante el día en 20°C. Los 10°C de la noche fueron escogidos tan bajos para evitar el exceso de estrés de las microalgas. El sensor de temperatura y el Sistema de gestión de datos con un manual controlado se utiliza para mantener la temperatura constant dentro de un rango de  $\pm 0,5^\circ\text{C}$ . Esto fue logrado mediante el uso de un intercambiador de calor a través de agua alrededor de un desgasificador y un Sistema de recirculación incluyendo un dispositivo enfriador/calentador. El punto de referencia de la temperatura era cambiado de forma manual, cambiando al punto de la noche al atardecer y al punto del día a la salida del sol. Cada temperatura de la noche se aplicó durante un período de 14 días en febrero y marzo de 2014, con irradiaciones de luz diarias variando entre 2 y 17 moles por fotones. Se eligieron estos meses por dos razones. En primer lugar, alrededor de marzo se produce el equinocio, con una luz del día y de la noche similar. Febrero, con más de 12 horas de noche fue elegido porque así tiene una duración mayor de enfriamiento. Se esperaba oscuro para tener un mayor efecto sobre la productividad, la biomasa, y la composición bioquímica.

### 1.3.3.3 Resultados y discusión

La Figura 14 muestra la productividad y rendimiento de luz de la microalga. Se muestra una concentración de biomasa de  $0,59 \pm 0,04 \text{ g/L}$  para todos los días experimentales y las tres diferentes temperaturas de cultivo en la noche. Cuando la cantidad de la luz medida como el flujo de fotones diarios aumenta, la productividad neta aumentó y el rendimiento de la luz disminuye. El rendimiento de la luz es siempre mayor a bajo flujo de fotones, ya que menos fotones se están desperdiciando como fluorescencia y calor.

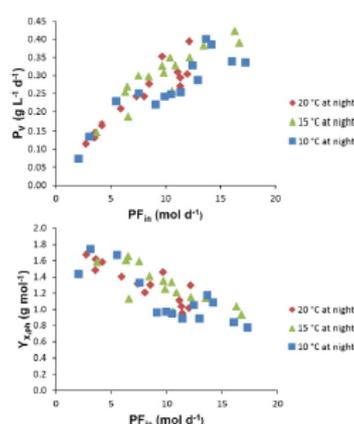


Figura 14. Resultado experimento

### 1.3.4 Modelado en CFD de la transferencia de calor convectivo interior

CFD se ha convertido en una herramienta popular para la investigación del calor por convección interior. Se utilizan dos métodos para hacer frente a la transferencia de calor por convección de las paredes en CFD. Una de ellas es aplicar funciones de pared, y el otro es para implementar la modelización próxima a la pared mediante la generación suficientemente fina de malla en la capa límite. El primer método es muy simple, sin

embargo, no puede ser aplicable a ambientes interiores. El segundo método es generalmente más preciso pero requiere un número significativo de rejilla de malla para capturar la subcapa límite viscosa. Esta investigación propone ajustar el número de Prandtl en la pared para modificar la función de la temperatura estándar en la pared. El ajuste intenta obtener coeficientes de transferencia de calor por convección, para paredes iguales a las proporcionadas por las fórmulas de la correlación. Debido a la variación de la transferencia de calor convectivo con el número de Prandtl es no lineal, es necesario repetir las simulaciones CFD siguiendo el procedimiento desarrollado. El método propuesto se ha aplicado a modelar tanto la transferencia de calor, el flujo de ventilación y un modo de ventilación por suelo radiante. Los resultados revelan que la función de la temperatura de la pared es capaz de resolver con precisión la transferencia de calor por convección de interior con un número moderado de cuadrícula. La función de la temperatura de la pared con el número de Prandtl produce una distribución de temperatura inaceptable, por lo tanto, no es adecuada para el modelado de transferencia de calor por convección interior.

#### **1.3.4.1 Introducción**

La transferencia de calor por convección entre la superficie de las paredes sólidas y el aire circundante desempeña un papel importante en la construcción de eficiencia energética, distribución interior de la temperatura del aire, la flotabilidad impulsada, etc. Debido a la condición de no deslizamiento de una pared estacionaria y al amortiguamiento viscoso por el fluido, se forma una capa límite delgada en la región cercana a la pared. Los perfiles de velocidad de aire tienen grandes gradientes dentro de las capas límite y se intercambia impulso en el mismo. Del mismo modo, la transferencia de energía térmica intensa puede también producirse en la región cercana a la pared, lo que lleva a un gran gradiente de temperatura al acercarse a la pared. Los perfiles de temperatura de aire dentro de las capas límites deben determinarse para predecir la velocidad de transferencia de calor por convección.

#### **1.3.4.2 Métodos**

En esta sección, la función de la pared de temperatura se perfila primero, seguido por nuestra estrategia propuesta para ajustar, lo cual conduce a la denominada función de la temperatura ajustada.

#### **1.3.4.3 Descripción de casos**

Para validar el ajuste propuesto a la pared, función de temperatura estándar, se estudiaron dos casos con convección interna. Uno utiliza un modo de ventilación de mezcla, y el otro emplea un modo de ventilación por desplazamiento de suelo radiante. La velocidad del aire medido y los perfiles de temperatura se aplicaron para evaluar la función de temperatura de la pared ajustada.

#### **1.3.4.4 Resultados**

Se aplicaron los perfiles de temperatura y velocidad para evaluar el método. Los perfiles calculados, en comparación con los calculados en las pruebas experimentalmente, no tenían parecido.

## **1.4 OBJETIVOS DEL TRABAJO FIN DE GRADO**

Véase la Introducción, pág.21.

# 2 PROCEDIMIENTO

Este bloque se encuentra dividido en tres etapas diferenciadas. En la primera de ellas, a través del cálculo CFD se estudia cómo va a moverse el aire. En la siguiente etapa, se realiza un análisis de viabilidad, estudiando la demanda energética con apoyo en la herramienta Hulc. Para terminar, una última etapa que trata el ahorro conseguido con las mejoras del frío nocturno.

## ETAPA 1: Cálculo CFD

Cálculo de los coeficientes de transferencia y patrones de flujo, es decir, conocer cómo se mueve el aire. Esta es la única herramienta que nos permite conocer el movimiento del aire.

## ETAPA 2: Análisis de viabilidad

Con apoyo en la herramienta unificada LIDER-CALENER (Hulc), calcular y estudiar la demanda energética.

## ETAPA 3: ACV

Análisis de viabilidad económica en base a parámetros influenciados por conceptos técnicos.

### 2.1 ETAPA 1: CFD

En esta fase, nos basamos en el trabajo realizado por [14], y continuamos con sus análisis.

#### 2.1.1 Alcance

En esta primera etapa, se utiliza CFD para solventar una serie de problemas, para caracterizar la presión que tenemos en las ventanas/paredes/rejillas, dependiendo del lugar en el que nos encontramos. De CFD se estudia:

1. Caracterización aerodinámica del edificio
2. Patrones de flujo
3. Cálculo de coeficientes de transferencia convectiva

#### 2.1.2 Ideas básicas CFD

El modelo CFD contiene, desde que se concibe y plantea el problema, hasta que se obtienen las soluciones deseadas, las siguientes etapas y componentes:

**1. Geometría 2D o 3D.** Se construye mediante la herramienta adecuada una geometría semejante al volumen de control que queremos estudiar. (Sería similar a la construcción de un modelo real, por ejemplo una habitación).

**2. Malla.** Mediante el software adecuado, se discretiza la geometría previamente planteada. Este suele ser uno de los puntos más críticos en el modelo ya que requiere gran conocimiento y destreza por parte del usuario, para generar una discretización lo suficientemente refinada y que se encuentre dentro de los límites

computacionales requeridos.

**3. Preparación del modelo.** En este punto se unen todos los elementos del modelo (Malla, condiciones de contorno y operacionales, etc). La realización de dicha tarea lleva a cabo en el software CFD (ANSYS Fluent, CFX, etc). En este se determinan las propiedades físicas de cada elemento de la malla y de las ecuaciones que rigen la física del problema.

**4. Resolución del modelo.** Acto seguido se monitorizan las variables necesarias para asegurar la convergencia del problema, y se da la orden al software de comenzar a iterar hasta alcanzar cierto grado de convergencia en la solución que debe ser determinado por el usuario.

**5. Extracción de resultados.** Una vez concluida la convergencia de la solución del modelo, se procede a la lectura de estos en el formato más práctico (Mapa de colores sobre la geometría, graficas 2D, Valores numéricos directos, etc.).

Como se comentará con mayor detalle posteriormente, durante el desarrollo de este modelado CFD algunos parámetros a determinar como el tipo de modelo turbulento, la generación de la malla, o el tipo de modelado para las regiones cercanas al muro, tienen una importancia crítica en la convergencia final el problema a unos resultados válidos.

### 2.1.2.1 Modelos turbulentos

Los programas CFD resuelven las ecuaciones de Navier-Stokes de los fluidos en cada nodo de la malla. Sin embargo, la resolución de estas ecuaciones no es unívoca y necesitan de varias ecuaciones de cierre. Es por ello que se han desarrollado diferentes modelos turbulentos a lo largo de la historia, cambiando en general la forma en la que suministran datos complementarios o la forma en la que cierra el sistema de ecuaciones.

Hoy en día, no existe ningún modelo turbulento que sea inexpugnable para cualquier tipo de problema. La elección del modelo turbulento vendrá determinada por el tipo de flujo existente, nivel de precisión requerido, potencia computacional disponible, etc.

Existen diferentes tipos de modelos turbulentos en función de cómo resuelven las ecuaciones de Navier-Stokes:

- **RANS (Reynolds-Averaged Approach):** Son los más comunes en la industria debido a su coste computacional bajo. Estos utilizan valores promedios en la resolución de las ecuaciones de Navier-Stokes e históricamente han probado su gran precisión en una amplia cantidad de casos.

- **LES (Large Eddy Simulation):** Así como en el caso de los RANS se resolvían las ecuaciones de Navier-Stokes bajo valores promedio, en los modelos LES se resuelven con los valores estrictos de las variables en nodo. Se entiende que la capa límite turbulenta tiene una distribución caótica formada por torbellinos de diferente tamaño (Ver apartado de Capa límite turbulenta) que forman la turbulencia en sí. Así, de manera ideal, los modelos LES modelarían y resolverían cada uno de los torbellinos generados. No obstante, para que el uso de estos modelos resulte factible en términos computacionales y temporales, se añade un filtro que determina un tamaño de torbellino que provoca que los torbellinos con tamaño inferior sean despreciados.

De esta manera, se tiene un modelo turbulento en el que la componente de “Modelado”, en la cual influye fuertemente la acción del usuario, pierda peso ya que al realizarse un cálculo estricto de las ecuaciones de los fluidos, muchas de los parámetros se encuentran ya determinados. Sin embargo, esta disminución de peso del “Modelado” se ve contrarrestada por el aumento de importancia de la componente “Cálculo” ya que la malla a introducir tendrá que ser mucho más fina que en los modelos RANS, llegando a requerirse gastos computacionales dos órdenes de magnitud superiores a los requeridos por los modelos RANS.

### 2.1.2.2 Modelos RANS

Se introducirán a continuación los modelos RANS de dos ecuaciones ya que resultarán objeto de estudio más adelante.

#### Modelos k-ε.

Dentro de la familia de los modelos k-ε podemos encontrar los modelos: Standard k-ε, RNG k-ε y Realizable k-ε.

Estos modelos presentan las mismas ecuaciones de transporte para  $k$  y  $\epsilon$ , pero existen algunas diferencias entre ellos como el método por el que se calcula la viscosidad, el número de Prandtl que gobierna la difusión turbulenta y la anulación o no de términos en la ecuación  $\epsilon$ .

### **Modelo Standard k- $\epsilon$ .**

Es el modelo k- $\epsilon$  es el modelo de dos ecuaciones más básico, aunque no por ello deja de tener gran utilidad en la industria desde que fue presentado por Launder y Spalding. Se trata de un modelo con una precisión razonable y un bajo coste computacional por lo que se utiliza regularmente en la simulación aerodinámica y de transferencia de calor.

No obstante, es conocido que dicho modelo consta de muchas limitaciones dependiendo de la aplicación tratada. Es por ello que se han ido realizando diferentes modificaciones para paliar estos vacíos.

A partir de dichas modificaciones se propicia la aparición de las variantes RNG k- $\epsilon$  y Realizable k- $\epsilon$ .

### **Modelo RNG k- $\epsilon$ .**

Este modelo está basado en la resolución de las ecuaciones de Navier-Stokes y las ecuaciones k- $\epsilon$  mediante la derivación basada en una técnica estadística llamada “Renormalization group theory” de sus mejoras frente al Standard son:

- Añade un término en la ecuación  $\epsilon$  que mejora la precisión en el cálculo de flujos de alta velocidad.
- Capta con mayor precisión los efectos de flujos con torbellinos.
- Mientras que el Standard k- $\epsilon$  se concebía para altos números Reynolds, el RNG k- $\epsilon$  incluye una fórmula que permite la adaptación a los efectos producidos por regímenes con bajos números de Reynolds.

Por tanto, este modelo resulta más preciso y fiable que el Standard k- $\epsilon$  aunque introduce un ligero incremento en la potencia computacional requerida.

### **Realizable k- $\epsilon$ .**

El término “realizable” indica que el modelo satisface ciertas restricciones matemáticas frente a las variaciones del Reynolds, y que lo hacen consistente con la física de los flujos turbulentos. Este introduce las siguientes variaciones respecto al modelo Standard:

- Incluye una nueva formulación para la viscosidad turbulenta.
- Se incluye una nueva ecuación de transporte que modifica la tasa de disipación ( $\epsilon$ ).

Uno de los beneficios del modelo Realizable es la mayor precisión en el cálculo de flujos con rotaciones, con fuertes gradientes de presiones en la capa límite, incluso con recirculación.

Tanto el modelo Realizable como el RNG muestran su superioridad frente al modelo Standard en la predicción de flujos. Sin embargo, debido a que el modelo Realizable es relativamente reciente, todavía no está establecido de manera consistente la supremacía de este sobre el modelo RNG.

### **Modelos k- $\omega$ .**

Existen dos variantes en los modelos k- $\omega$ : Standard y SST (Shear-stress transport). Como en el caso anterior, ambos se rigen por las mismas ecuaciones de transporte para  $k$  y  $\omega$ . Sin embargo existen algunas diferencias notables entre ambas variantes:

- Transición de la característica del modelo Standard k- $\omega$  en la zona interna de la capa límite, a la versión para altos números de Reynolds del modelo k- $\epsilon$  en la zona central del fluido (Este fenómeno de transición caracteriza a la variante SST ya que es una mezcla de su variante Standard y del modelo k- $\epsilon$ ).
- Modificaciones en la viscosidad turbulenta que afectara a los efectos de transporte.

### **Modelo Standard k- $\omega$ .**

Este modelo está basado en el modelo k- $\omega$  planteado por Wilcox. Incorpora además modificaciones para incluir efectos de bajos números de Reynolds. Es un modelo empírico, el cual ha sido modificado a lo largo de

los años adquiriendo términos en sus ecuaciones, consiguiéndose de esta manera un modelo con una buena precisión en el cálculo de flujos libres de tensiones.

### Modelo SST k- $\omega$ (Shear-Stress Transport).

Este modelo fue desarrollado por Menter para fusionar la gran precisión del modelo k- $\omega$  en la zona cercana a la pared, con la independencia entre los flujos planteada por el modelo k- $\epsilon$  en la zona lejana al muro. Para esto, se reformula el modelo k- $\epsilon$  como k- $\omega$ .

Esto propicia que el modelo SST k- $\omega$  resulte más efectivo para un mayor abanico de flujos que el standard.

#### 2.1.2.3 Capa limite en CFD.

Se analiza ahora el tratamiento de la capa límite en programas CFD. Esto es necesario ya que el modelado de la capa limite resulta uno de los parámetros más críticos en el planteamiento y resolución del modelo.

En régimen turbulento, la presencia de muros afecta en gran medida al comportamiento del fluido. Esto es debido a que el flujo turbulento esta dominado por fuerzas de inercia, y por tanto, ante la aparición de un elemento fijo se producen altos gradientes de velocidad, así como saltos muy bruscos en la resolución de las ecuaciones de Navier-Stokes.

Por todo ello, la precisión de la solución numérica queda comprometida ya que estos muros son la fuente principal de la generación de vórtices y de turbulencia.

Es necesario pro tanto, efectuar una representación de dicha capa límite de manera precisa para obtener una buena predicción de los flujos turbulentos delimitados por dichas superficies.

En la herramienta ANSYS Fluent se plantean varias formas de modelar la capa limite, sin embargo, antes de ser presentadas es necesario introducir un concepto de gran importancia para el tratamiento de estos fenómenos, el llamado  $y^+$ .

#### 2.1.2.4 $y^+$ ( $y^+$ ).

Se trata de una medida de longitud adimensional utilizada para determinar el refinamiento necesario que debe tener la malla en la zona cercana al muro para cumplir las condiciones necesarias para el buen funcionamiento del tratamiento cercano a la pared seleccionado en la herramienta ANSYS Fluent.

$$y^+ = y \cdot \frac{u_\tau}{\nu}$$

Donde  $y$  es la distancia (en metros) desde la superficie del modelo hasta el primer nodo más cercano de la malla.

La adimensionalización provoca que, independientemente de las condiciones del flujo o del espesor de la capa limite, el mismo valor de  $y^+$  siempre se encontrará en la misma zona proporcional de esta capa limite.

Si recordamos lo mencionado anteriormente, la capa limite turbulenta se puede dividir en tres subcapas bien diferenciadas. De esta manera, cada subcapa se encuentra en un rango de  $y^+$  determinado, sea cual sea la condición de operación. Los valores se muestran en la figura de manera aproximada.

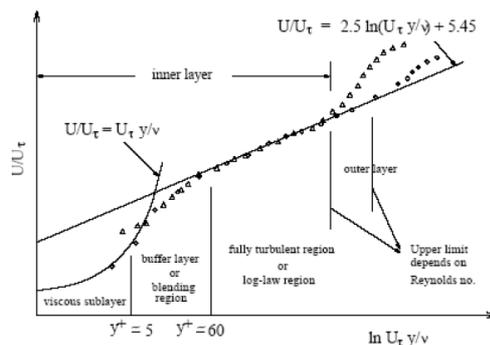


Figura 15. Esquema de la capa turbulenta y la relación de  $y^+$

Por tanto, se dilucida la importancia de dicho parámetro, el cual nos permite determinar el tamaño de refinamiento de la malla sin necesidad de singularizar para cada caso planteado.

No obstante, es cierto que la malla se construirá con los valores reales de “ $y$ ” y no con  $y^+$ .

### 2.1.2.5 Tratamientos cercanos al muro.

Para el modelado y representación de dicha capa límite se introducen en la herramienta CFD dos tratamientos cercanos a la pared que cubren diferentes rangos de turbulencia, gasto computacional y precisión arrojada.

Estos tratamientos son: Wall-Function y Near-Wall Model (Tratamiento refinado).

El primero no resuelve la subcapa viscosa ni la de transición, sino que utiliza formulas semi-empiricas llamadas “Wall-Function (o funciones de pared)” que unen los efectos de la propia superficie con la subcapa turbulenta totalmente desarrollada, generando así un efecto “parche”.

El segundo tratamiento por el contrario, es capaz de resolver la capa límite al completo, aunque esto requiera un mayor refinamiento en todo el modelo y por tanto, una mayor potencia computacional.

Se representa en la figura siguiente, un esquema gráfico del efecto y funcionamiento de cada uno de los tratamientos cercanos al muro.

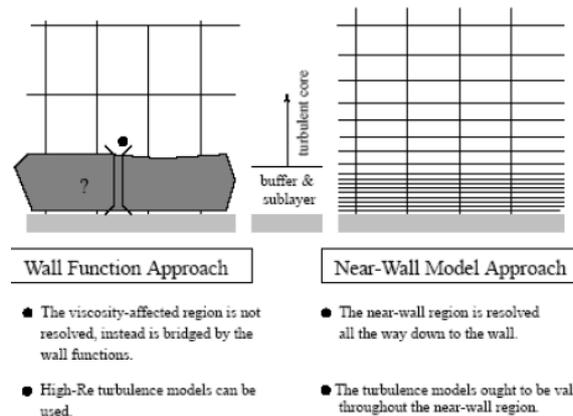


Figura 16. Representación de los tratamientos cercanos al muro

Bajo las características expuestas, el tratamiento Wall-Function suele ser utilizado en aplicaciones de altos números de Reynold ya que la zona afectada por la viscosidad se ve reducida en tamaño y por tanto el error que introduce este tratamiento al estimar la zona viscosa es más pequeño, y además, el gasto computacional es sensiblemente inferior al segundo tratamiento.

Sin embargo, si se trata con flujos de bajos números Reynolds, o se precisa de gran precisión en la zona de capa límite, es necesaria la utilización de “Near-Wall Model”.

### 2.1.2.6 $y^+$ requerido en cada tratamiento.

Este parámetro cobra importancia en el momento en que cada tipo de tratamiento cercano al muro requiere que el primer nodo de su malla esté situado en un punto diferente de la capa límite.

A modo de resumen, los intervalos aproximados que relacionan el  $y^+$  y la posición en la capa límite son: Subcapa viscosa  $y^+=0-5$ , Capa de transición  $y^+=5-30$ , Capa turbulenta completamente desarrollada  $y^+=30-300$ .

De esta manera, cuando se utilice el tratamiento de “Wall-Function” será condición necesaria situar el primer nodo en el intervalo  $y^+=30-300$ , ya que el primer punto debe caer una vez superada la zona de transición (Para aplicar el efecto parche o puente desde la superficie a la subcapa turbulenta).

Por otro lado, si se decide aplicar el “Near-Wall Model” será necesario conseguir un  $y^+ \approx 1$ , ya que este requiere que el primer nodo este contenido en una zona media-baja de la subcapa viscosa. En cualquier caso, siempre es imprescindible evitar la colocación de dicho primer nodo en la zona de transición entre  $y^+=5-20$ .

### 2.1.3 Caracterización aerodinámica del edificio

El coeficiente de presión adimensional es un parámetro empírico que toma en cuenta los cambios en la presión inducida por el viento causada por la influencia de las obstrucciones del entorno sobre las características del viento local prevaleciente. Su valor cambia acorde a la dirección del viento, orientación del edificio y topografía y rugosidad del terreno en la dirección del viento. La siguiente figura muestra la distribución del  $C_p$  en un edificio obtenido experimentalmente.

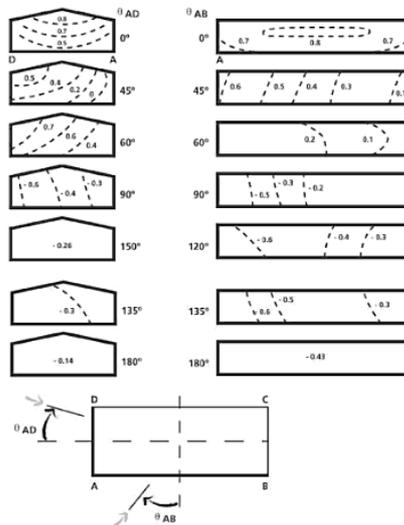


Figura 17. Distribución de la presión del viento sobre las fachadas para distinta incidencia del viento

Numerosos artículos sobre el coeficiente de presión han sido publicados en los últimos años, pero muy pocos presentan un método preciso para calcular el  $C_p$ , ya que la mayoría son resultados experimentales que determinan  $C_p$  bajo circunstancias puntuales.

1. El AIVC (Air Infiltration & Ventilation Center) desarrollo una serie de tablas, basadas en pruebas con túneles de viento, para ayudar a los diseñadores en la elección del  $C_p$ . Estas tablas fueron desarrolladas para edificios de baja altura, hasta 3 pisos y para los siguientes casos:
  - o Relación entre largo y ancho: 1:1 y 2:1
  - o Condición del entorno local del edificio: al edificio se lo considera expuesto, rodeado de obstrucciones equivalentes a la mitad de la altura del edificio o rodeado de obstrucciones equivalentes a la altura del edificio.

Los valores de  $C_p$  están correlacionados con la velocidad local del viento que fuera medida a la altura del edificio. Están dados para las cuatro fachadas del edificio, tres tipos de inclinación de techos ( $<10^\circ$ ,  $11-30^\circ$ ,  $>30^\circ$ ) y ocho direcciones del viento.



	Relación entre largo y ancho: 1:1								Relación entre largo y ancho: 2:1							
	0°	45°	90°	135°	180°	225°	270°	315°	0°	45°	90°	135°	180°	225°	270°	315°
Face 1	0.7	0.36	-0.5	-0.4	-0.2	-0.4	-0.5	0.35	0.5	0.25	-0.5	-0.8	-0.7	-0.8	-0.5	0.25
Face 2	-0.2	-0.4	-0.5	0.35	0.7	0.35	-0.5	-0.4	-0.7	-0.8	-0.5	0.25	0.5	0.25	-0.5	-0.8
Face 3	-0.5	0.36	0.7	0.35	-0.5	-0.4	-0.2	-0.4	-0.9	0.2	0.5	0.2	-0.9	-0.8	-0.35	-0.8
Face 4	-0.5	-0.4	-0.2	-0.4	-0.6	0.35	0.7	0.35	-0.9	-0.6	-0.35	-0.6	-0.9	0.2	0.6	0.2
<10° Front	-0.8	-0.7	-0.8	-0.5	-0.4	-0.5	-0.6	-0.7	-0.7	-0.7	-0.8	-0.7	-0.7	-0.7	-0.8	-0.7
<10° Rear	-0.4	-0.6	-0.6	-0.7	-0.6	-0.7	-0.6	-0.5	-0.7	-0.7	-0.8	-0.7	-0.7	-0.7	-0.8	-0.7
<10° Avg.	-0.6	-0.6	-0.6	-0.6	-0.6	-0.6	-0.6	-0.6	-0.7	-0.7	-0.8	-0.7	-0.7	-0.7	-0.8	-0.7
<30° Front	-0.4	-0.6	-0.6	-0.5	-0.4	-0.5	-0.6	-0.5	-0.7	-0.7	-0.7	-0.6	-0.5	-0.6	-0.7	-0.7
<30° Rear	-0.4	-0.6	-0.6	-0.5	-0.4	-0.5	-0.6	-0.5	-0.5	-0.6	-0.7	-0.7	-0.7	-0.7	-0.7	-0.6
<30° Avg.	-0.4	-0.6	-0.6	-0.5	-0.4	-0.5	-0.6	-0.5	-0.6	-0.65	-0.7	-0.65	-0.6	-0.65	-0.7	-0.65
>30° Front	0.3	-0.4	-0.6	-0.4	-0.5	-0.4	-0.6	-0.4	0.25	0	-0.6	-0.9	-0.8	-0.9	-0.6	0
>30° Rear	-0.5	-0.4	-0.6	-0.4	0.3	-0.4	-0.6	-0.4	-0.8	-0.9	-0.6	0	0.25	0	-0.6	-0.9
>30° Avg.	-0.1	-0.4	-0.6	-0.4	-0.1	-0.4	-0.6	-0.4	-0.18	-0.45	-0.6	-0.45	-0.18	-0.45	-0.6	-0.45

Tabla 2. Valores de Cp para un edificio expuesto



	Relación entre largo y ancho: 1:1								Relación entre largo y ancho: 2:1							
	0°	45°	90°	135°	180°	225°	270°	315°	0°	45°	90°	135°	180°	225°	270°	315°
Face 1	0.4	0.1	-0.3	-0.35	-0.2	-0.35	-0.3	0.1	0.25	0.08	-0.35	-0.8	-0.5	-0.6	-0.35	0.08
Face 2	-0.2	-0.35	-0.3	0.1	0.4	0.1	-0.3	-0.35	-0.5	-0.6	-0.35	0.08	0.25	0.08	-0.35	-0.6
Face 3	-0.3	0.1	0.4	0.1	-0.3	-0.35	-0.2	-0.35	-0.6	0.2	0.4	0.2	-0.6	-0.6	-0.3	-0.5
Face 4	-0.3	-0.35	-0.2	-0.35	-0.3	0.1	0.4	0.1	-0.6	-0.5	-0.3	-0.5	-0.6	0.2	0.4	0.2
<10° Front	-0.6	-0.6	-0.4	-0.5	-0.6	-0.5	-0.4	-0.6	-0.6	-0.6	-0.6	-0.6	-0.6	-0.6	-0.6	-0.6
<10° Rear	-0.6	-0.5	-0.4	-0.5	-0.6	-0.5	-0.4	-0.5	-0.8	-0.6	-0.6	-0.6	-0.6	-0.6	-0.6	-0.6
<10° Avg.	-0.6	-0.5	-0.4	-0.5	-0.6	-0.5	-0.4	-0.5	-0.6	-0.6	-0.6	-0.6	-0.6	-0.6	-0.6	-0.6
<30° Front	-0.35	-0.45	-0.55	-0.45	-0.35	-0.45	-0.55	-0.45	-0.6	-0.6	-0.55	-0.55	-0.45	-0.55	-0.55	-0.6
<30° Rear	-0.35	-0.45	-0.55	-0.45	-0.35	-0.45	-0.55	-0.45	-0.45	-0.55	-0.55	-0.6	-0.6	-0.6	-0.55	-0.55
<30° Avg.	-0.35	-0.45	-0.55	-0.45	-0.35	-0.45	-0.55	-0.45	-0.5	-0.6	-0.55	-0.6	-0.5	-0.6	-0.55	-0.6
>30° Front	0.3	-0.5	-0.6	-0.5	-0.5	-0.5	-0.6	-0.5	0.15	-0.08	-0.4	-0.75	-0.6	-0.75	-0.4	-0.08
>30° Rear	-0.5	-0.6	-0.6	-0.5	0.3	-0.5	-0.6	-0.5	-0.6	-0.75	-0.4	-0.08	0.15	-0.08	-0.4	-0.75
>30° Avg.	-0.1	-0.5	-0.6	-0.5	-0.1	-0.5	-0.6	-0.5	-0.2	-0.4	-0.4	-0.4	-0.2	-0.4	-0.4	-0.4

Tabla 3. Valores de Cp para un edificio rodeado por obstrucciones equivalentes a la mitad del edificio.



	Relación entre largo y ancho: 1:1								Relación entre largo y ancho: 2:1							
	0°	45°	90°	135°	180°	225°	270°	315°	0°	45°	90°	135°	180°	225°	270°	315°
Face 1	0.2	0.05	-0.25	-0.3	-0.25	-0.3	-0.25	0.05	0.08	-0.12	-0.2	-0.38	-0.3	-0.38	-0.2	-0.12
Face 2	-0.25	-0.3	-0.25	0.05	0.2	0.05	-0.25	-0.3	-0.3	-0.38	-0.2	-0.12	0.08	-0.12	-0.2	-0.38
Face 3	-0.25	0.05	0.2	0.05	-0.25	-0.3	-0.25	-0.3	-0.3	0.15	0.16	0.15	-0.3	-0.32	-0.2	-0.32
Face 4	-0.25	-0.3	-0.25	-0.3	-0.25	0.05	0.2	0.05	-0.3	-0.32	-0.2	-0.32	-0.3	0.15	0.16	0.15
<10° Front	-0.5	-0.5	-0.4	-0.5	-0.5	-0.4	-0.4	-0.5	-0.49	-0.46	-0.41	-0.46	-0.49	-0.46	-0.41	-0.46
<10° Rear	-0.5	-0.5	-0.4	-0.5	-0.5	-0.4	-0.4	-0.5	-0.49	-0.46	-0.41	-0.46	-0.49	-0.46	-0.41	-0.46
<10° Avg.	-0.5	-0.5	-0.4	-0.5	-0.5	-0.4	-0.4	-0.5	-0.49	-0.46	-0.41	-0.46	-0.49	-0.46	-0.41	-0.46
<30° Front	-0.3	-0.4	-0.5	-0.4	-0.3	-0.4	-0.5	-0.4	-0.49	-0.46	-0.41	-0.46	-0.4	-0.46	-0.41	-0.46
<30° Rear	-0.3	-0.4	-0.5	-0.4	-0.3	-0.4	-0.5	-0.4	-0.4	-0.46	-0.41	-0.46	-0.49	-0.46	-0.41	-0.46
<30° Avg.	-0.3	-0.4	-0.5	-0.4	-0.3	-0.4	-0.5	-0.4	-0.45	-0.46	-0.41	-0.46	-0.45	-0.46	-0.41	-0.46
>30° Front	0.25	-0.3	-0.5	-0.3	-0.4	-0.3	-0.5	-0.3	0.08	-0.16	-0.23	-0.6	-0.42	-0.6	-0.23	-0.15
>30° Rear	-0.4	-0.3	-0.5	-0.3	0.25	-0.3	-0.5	-0.3	-0.42	-0.6	-0.23	-0.15	0.08	-0.15	-0.23	-0.6
>30° Avg.	-0.08	-0.3	-0.5	-0.3	-0.08	-0.3	-0.5	-0.3	-0.18	-0.4	-0.23	-0.4	-0.18	-0.4	-0.23	-0.4

Tabla 4. Valores de Cp para un edificio rodeado por obstrucciones equivalentes a la altura del edificio.

- Un programa de computación, llamado TNO Cp-Generator, fue desarrollado en Holanda para predecir los valores de Cp en fachadas y techos de distintos edificios. Este programa se basa en datos extraídos de experiencias en túneles de viento, y su mayor virtud es la de requerir pocos datos de ingreso: dimensión del edificio, dimensión y ubicación de los obstáculos y rugosidad del terreno. El programa brinda un gráfico como el de la Figura

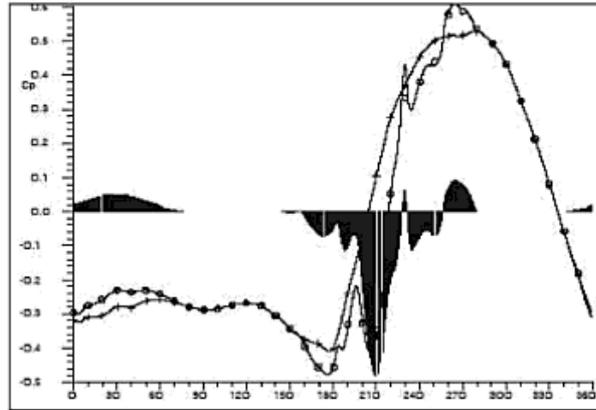


Figura 18. Resultado típico del TNO Cp-Generator: Cp versus dirección del viento.

Basándonos en estos estudios, se demuestra que el  $C_p$  depende de la dirección y velocidad del viento y de cómo éste incide sobre el edificio. Se encuentra una gran dificultad para calcular esta variable, por lo que lo que encontramos una solución en el uso de la herramienta CFD para paliar estas dificultades.

#### 2.1.4 Protocolo General de cálculo CFD de coeficientes de transferencia de calor convectivo.

El objetivo principal de este apartado es la formulación del Protocolo de modelado en su totalidad, de manera que se puedan contemplar de una manera fácil y rápida todos los pasos que este incluye desde el planteamiento del problema hasta su resolución.

Antes del punto en el que se formula el protocolo en su totalidad, se introducirán algunas consideraciones adicionales que son importantes en el modelado.

Es necesaria la introducción de algunos elementos a determinar que forman también parte del modelo CFD.

##### 2.1.4.1 Condiciones de contorno de entrada y salida

Cobra cierta importancia la forma en la que se asigna las condiciones de contorno en las secciones de entrada del fluido y en la de salida, ya que, según la opción tomada, se esperará cierto problema en la convergencia, un comportamiento más real, etc.

Tanto la determinación de las condiciones de entrada o salida presentan en la práctica tres tipos de caracterización del fluido que la traspasa:

- **Determinación de la velocidad (de manera vectorial):** Se determina una cierta velocidad en m/s y la especificación direccional de dicha magnitud. Esta no presenta en concreto fenómenos de inestabilidad y puede resultar realista si el aparato simulado es por ejemplo un ventilador que funcione en dicha dirección determinada.
- **Determinación de la presión diferencial:** Se determina la presión diferencial a la que entraría el aire respecto a cierto punto de referencia. Tampoco presenta específicamente fenómenos de inestabilidad y realiza una representación más real en la caracterización del efecto del viento, u otros sistemas en los que se establezca una diferencia de presión.
- **Determinación de la cantidad de masa de fluido (Key-Target):** Esta condición suele ser ciertamente solicitada en la práctica del modelado en recintos internos, ya que la ventilación de un local vendría determinada por dicha característica. A menudo presenta altos problemas de convergencia por lo que se suele estimar una presión diferencial asociada, y cuando la solución se estabiliza, se modifica la condición de contorno introduciendo una imposición de cantidad de masa (en adelante referido por Key-Target). Si la solución obtenida finalmente, es la oscilación de dicho parámetro, "Cantidad de masa de fluido", se puede definir la solución con un margen de error de la diferencia entre los valores pico.

Además, existe otro punto importante que será la determinación de la turbulencia en el fluido de entrada y de salida. Existen diferentes maneras de especificarlo, desde dar valores a las ecuaciones de cierre de cada modelo, a introducir el valor para la combinación de dos variables turbulentas. En la práctica, se suele utilizar la determinación de los valores de Turbulencia del fluido (%) que se mueve en valores de 1/10% para fluidos muy poco o muy turbulentos respectivamente, y la longitud equivalente (m).

#### 2.1.4.2 Formulación del protocolo general.

Una vez determinado esto, se recoge a continuación el conjunto de elementos necesarios. A su vez, esto se presenta para dos niveles de detalle requerido:

- **Alta precisión** Este es requerido cuando se necesita determinar una magnitud afectada por los efectos microscopios (p ej. Coeficiente de película), o también cuando se requiere cierta validez en la solución a nivel cuantitativo.
- **Baja-Media precisión** Esta opción implicará que el modelo no tiene una validez cuantitativa contrastada, especialmente en las variables que se determinen en función de los efectos cercanos al muro. No obstante, ya que resultan modelos de muy bajo gasto computacional, pueden ser útiles en la determinación de los patrones de flujo de aire, o el estudio de la ventilación de un recinto a nivel cualitativo o semi-cuantitativo.

##### 2.1.4.2.1 Determinación del margen de error en solución.

La determinación del margen de error impuesto en la solución encontrada bajo la aplicación del protocolo se llevará a cabo de la siguiente manera:

1.- Se evaluarán todos los parámetros que incluyen cierto nivel de error ( $\Delta\epsilon_{\text{MODELO}}$ ,  $\Delta\epsilon_{\text{MALLA}}$ ,  $\Delta\epsilon_{\text{OTROS}}$  (Capa prismáticas, Numero de elementos, etc)) para cada una de las superficies.

2.- Se asigna el error más elevado de entre los anteriormente planteados a su correspondiente superficie, siempre que este valor supere el  $\Delta\epsilon_{\text{INICIAL}}$ .

##### 2.1.4.2.2 Esquema general del Protocolo de modelado en CFD para Recintos Interiores.

Bajo todas las consideraciones previas, se recoge en el ANEXO II un esquema del protocolo desarrollado. A su vez, se presentan dos versiones, una de alta precisión, y por tanto mayor costo computacional, y una de baja precisión para análisis semi-cuantitativo.

## 2.2 ETAPA 2: EVALUACIÓN DE AHORROS

Para evaluar el desempeño de este elemento en un edificio y realizar su posterior certificación, se debe emplear la opción de las “capacidades genéricas de la envuelta” de la “Herramienta unificada LIDER CALENER”.

La idea es usar una herramienta de simulación del comportamiento energético de edificios para calcular la situación de partida del edificio, y poder comparar la situación de partida con la situación mejorada con ventilación nocturna.

Para la realización de este procedimiento se sintetizan algunas pinceladas en las siguientes líneas. Para más información se remite al lector al manual de usuario de la herramienta.

Para la definición de la medad, es necesario partir de un edificio definido previamente con la “Herramienta unificada LIDER-CALENER”). Para realizar la definición de una capacidad adicional de tipo genérica en la Herramienta Unificada LIDER-CALENER, se selecciona el botón correspondiente en el gestor de capacidades adicionales:

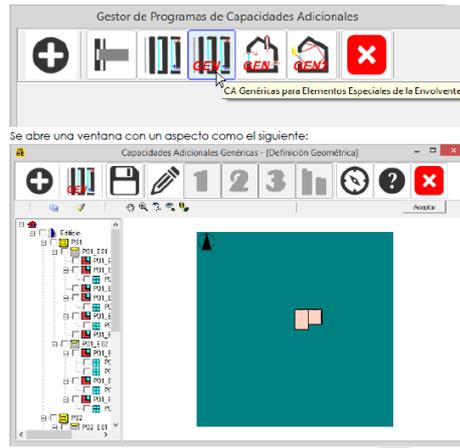


Figura 19. Herramienta unificada LIDER-CALENER

Ahora bien esta modelización detallada puede ser comparada con una modelización simplificada como la que sigue a continuación.

El modelado para la demanda de refrigeración [kWh/m<sup>2</sup>] queda en función del edificio, del clima y de la propia identificación/ajuste realizado:

$$D_{REF}^{IDEAL} \square = b_R \cdot Q_{GAN-SOL} + Q_{GAN-FI} + Q_{GAN-E} - a_R \cdot \eta_{REF} \cdot [Q_{PER-R}]$$

El único término nuevo con respecto a la demanda de calefacción es el término de ganancias por transmisión y ventilación/infiltraciones. Este término responde a la dualidad de este flujo.

$$Q_{GAN-E} = GE/A_u$$

$$GE = \rho \cdot c_p \cdot V \cdot ACH_{eq} \cdot \frac{24 \cdot GD25G}{3600} + U_M \cdot A_t \cdot \frac{24 \cdot GD25G}{1000}$$

Como único dato nuevo:

$GD25G$  Grados día como Temperatura seca exterior menos 25 cuando esta es superior a 25°C, en °C.

Relacionado con el punto anterior, el efecto de pérdidas posible por transmisión y ventilación/infiltraciones resulta:

$$Q_{PER-R} = PE/A_u$$

$$PE = \rho \cdot c_p \cdot V \cdot ACH_{eq} \cdot \frac{24 \cdot GD25P}{3600} + U_M \cdot A_t \cdot \frac{24 \cdot GD25P}{1000}$$

Como único dato nuevo:

$GD25P$  Grados día 25 menos Temperatura seca exterior cuando está es inferior a 25°C, en °C,

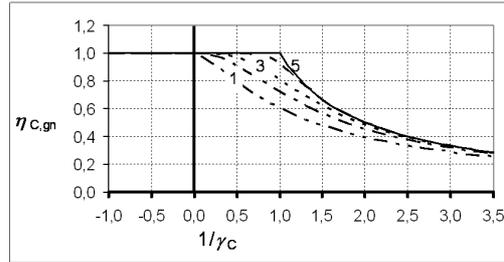
El enfriamiento nocturno se modela como unas renovaciones de hora durante las horas de noche  $GD_{NOCHE}$ .

$$Q_{NC} = \Delta n_{NOCHE} \cdot \rho \cdot C_P \cdot h \cdot GD_{NOCHE} \cdot 24/1000$$

En refrigeración, se requiere obtener las pérdidas netas o útiles. Para ello se necesita obtener un valor para el factor de utilización de refrigeración.

$$Q_{PÉRDIDAS-NETAS} = FU \cdot Q_{PÉRDIDAS} = FU \cdot Q_V + Q_T = \eta_{REF} \cdot Q_V + Q_T$$

Puesto que la formulación teórica y la estimada no dependen, bajo las simplificaciones realizadas, de la estación en la que se encuentre, se admite la constante de tiempo como única y aceptada para ambos regímenes.



**Figura 20. Factor de utilización para el régimen de refrigeración**

Siguiendo la misma referencia, la formulación del factor de utilización se hace en tres tramos en la norma [4], en función de  $\gamma_R$  cociente entre ganancias y pérdidas netas para el periodo de refrigeración tomado, resultando:

$$\text{Si } \gamma_R > 0 \text{ y } \gamma \neq 1 \rightarrow \eta_{REF} = \frac{1 - \gamma_R^{-a_R}}{1 - \gamma_R^{-(a_R+1)}}$$

$$\text{Si } \gamma_R = 1 \rightarrow \eta_{REF} = \frac{a_R}{a_R+1}$$

$$\text{Si } \gamma_R < 0 \rightarrow \eta_{REF} = 1$$

Sobre el factor de utilización para corregir el valor de las pérdidas brutas no se han encontrado referencias significativas. Aunque, solventado el problema de la constante de tiempo, las herramientas quedarían definidas de forma análoga a la formulación para calefacción.

El problema es que esta formulación no tiene en cuenta el efecto de la activación ni la eficiencia de carga/descarga de la inercia térmica del edificio. En este proyecto se persigue analizar en mayor detalle su efecto mediante el cálculo de coeficientes de transferencia convectiva asociados a los elementos de interés. De ahí que esta formulación simplificada no sea suficiente.

La ventilación nocturna modelada en la herramienta detallada tiene tres decisiones:

- Duración del periodo de operación en tiempo durante la noche y en meses (estación de refrigeración)
- Cálculo de patrones de flujo en el interior del edificio
- Cálculo de coeficientes de transferencia convectivo asociados

En la aplicación 4 se explica sobre un caso estudio la aplicación de la metodología.

## 2.3 ETAPA 3: ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA

Teniendo en cuenta las mejoras que ocasiona la implantación de medidas para la mejora nocturna energética, a continuación se muestra el ahorro generado en tal implantación.

Para empezar, se calculan los costes que intervienen.

- Costes iniciales
- Costes de operación
- Costes totales

El ahorro se basa en el cálculo de parámetros influenciados por conceptos técnicos (costes anteriores).

El coste inicial consiste en evaluar el coste del sistema a partir del coste de los equipos principales en la instalación, es decir, a partir de bombas, depósitos.

Los costes de operación son los costes derivados de todos los consumos: de energía, de servicios, de materias primas, que necesite el proceso anualmente, expresado en unidades monetarias.

El coste total es la suma del coste inicial de la instalación, y el coste de operación durante el ciclo de vida.

Dos parámetros se utilizan para la comparación de las alternativas de diseño de aplicaciones, ambos se calculan a partir del denominado Valor Presente Neto (VPN) de una inversión, calculado como:

$$VPN = Valor\ presente\ beneficios - Valor\ presente\ de\ costes$$

Sería mejor opción aquella con mayor VPN.

### 2.3.1 Plazo de recuperación del Capital

Es el número de años que hace que el VPN sea nulo. Es el plazo de tiempo necesario para recuperar la inversión inicial, es decir, cuanto más corto mejor.

$$0 = SPV\ Ingresos - Gastos\ anuales, i, N + VP\ Valor\ residual, i, N - Costes\ iniciales$$

Siendo N el número de años que se tarda en recuperar la inversión, e i el tipo de interés.

### 2.3.2 Tasa interna de Rentabilidad (TIR)

Es el tipo de interés que tendría que tener el dinero para que el VPN fuese nulo. Cuanto mayor sea, mejor, mas rentable es la inversión realizada.

$$0 = SPV\ Ingresos - Gastos\ anuales, i, N + VP\ Valor\ residual, i, N - Costes\ iniciales$$

### 2.3.3 Ahorro obtenido

Teniendo en cuenta el consumo eléctrico, los costes de instalación, los costes de operación y los costes de mantenimiento de la instalación, el ahorro se calcula como:

$$Ahorro = VPN_{actual} - VPN_{anterior}$$

El ahorro generado sería función de kWh, pero fácilmente, conociendo el precio en Euros por kW, obtenemos el ahorro conseguido en Euros.

A tener en cuenta, el procedimiento permite obtener el ahorro con los años. Ya que el ahorro en nuestra aplicación depende del clima, debemos suponer un panorama climático para hacer la simulación en N años. Otra opción es suponer que el clima se repite, es decir, suponer el clima de los N años anteriores.

# 3 APLICACIONES

A continuación, se muestran las aplicaciones necesarias para la caracterización de la ventilación nocturna en edificios.

## 3.1 APLICACIÓN 1: DEFINICIÓN DE CONDICIONES DE CONTORNO

### 3.1.1 Descripción

La presente aplicación sirve como ejemplo de la aplicación del procedimiento descrito en el trabajo fin de grado para la caracterización aerodinámica de la envuelta de edificios. El objetivo de la aplicación es el cálculo del coeficiente de presiones en la envuelta de un faro. Para ello, este edificio es modelado en el interior de un túnel de viento.

Los objetivos secundarios conseguidos son:

- Consolidar el procedimiento CFD de caracterización aerodinámica mediante la definición de un túnel de viento
- Resolver las dudas e incertidumbres ligadas a la malla y los modelos a emplear
- Demostrar la validez del procedimiento, discutiendo diferentes alternativas y comparándolo con resultados analíticos.

En una primera etapa se construye una geometría de un faro típico. De este edificio interesa el flujo de aire alrededor de su columna.

En la segunda etapa se malla el faro siguiendo las directrices del procedimiento, pero analizando la influencia de la capa límite y del refinado de malla. Esta segunda etapa es importante de cara a las conclusiones adoptables para la simulación de recintos de mayor entidad, por ejemplo barrios.

Finalmente, en el documento se presenta la síntesis de decisiones adoptadas en Fluent.

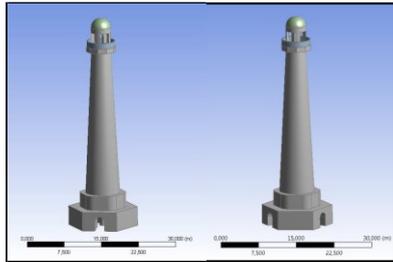
### 3.1.2 Geometría

El diseño inicial del Faro se ha realizado siguiendo la geometría y dimensiones de distintos modelos de faros reales que se muestran en la Figura 21.

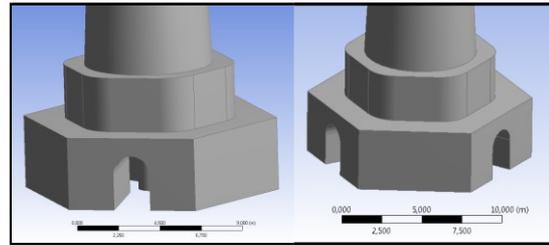


Figura 21. De izquierda a derecha: Faro de Cabo Hatteras, Faro de Pensacola, Faro Split Point.

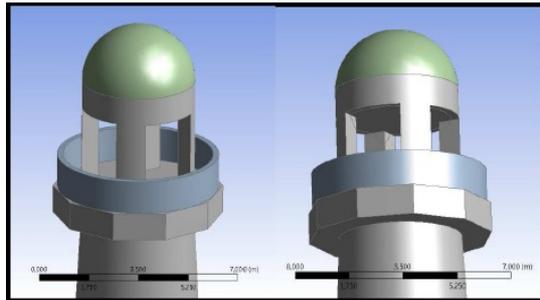
En la Figura 22 se observa el diseño inicial del Faro. En las Figura 23, Figura 24 y Figura 25 se muestran en detalle la base, la parte superior, y la planta superior e inferior del Faro respectivamente.



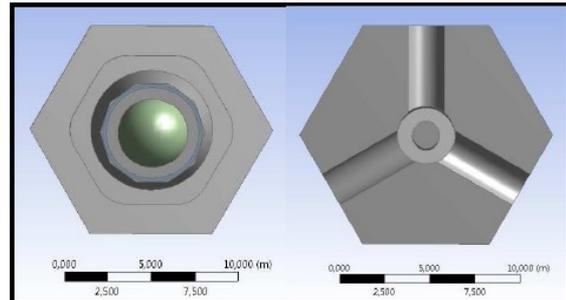
**Figura 22. Diseño inicial del Faro**



**Figura 23. Base del faro**



**Figura 24. Parte superior del faro**

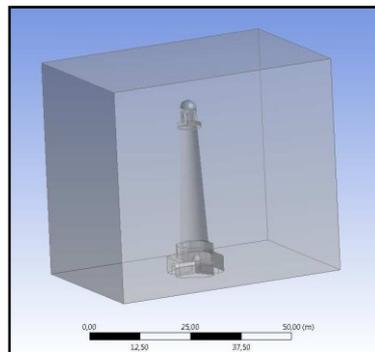


**Figura 25. Planta superior e inferior del faro**

Para la creación del túnel de viento se diseña un prisma rectangular sólido con la geometría del Faro centrado en el interior partiendo de su base. Mediante una operación “booleana” se extrae un cuerpo sólido dentro de otro cuerpo sólido, es decir, extrae el Faro de la geometría del túnel de viento.

Las dimensiones del túnel de viento son:

- Anchura: 60 m.
- Altura: 54 m.
- Profundidad: 100 m.



**Figura 26. Modelo inicial del túnel de viento**

Cabe comentar que aunque la geometría del túnel de viento es pequeña, se ha conseguido aprender a manipular las condiciones de contorno para poder desarrollar el flujo de entrada antes de su incidencia con el faro y también a variar la dirección del mismo. Es por ello que no se necesita una geometría mayor.

### 3.1.3 Malla

Tras la creación de superficies y seleccionado el tamaño de malla global, así como el refinado de la malla de la columna que ya se ha explicado en el modelo sin capa límite, se procede a la creación de las capas de refinado en la superficie de la columna del Faro mediante el módulo ICEM de ANSYS 14.0 para el posterior estudio del comportamiento del fluido en la capa límite.

En primer lugar, se selecciona en el “Part Mesh Setup” que la malla en la superficie de la columna la conformen prismas.

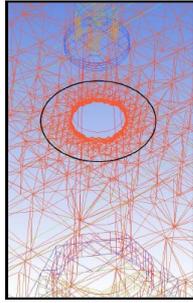


Figura 27. Capas de prismas alrededor de lFaro

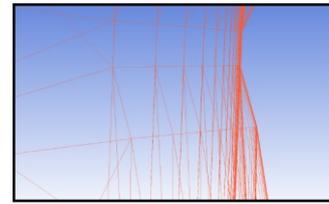


Figura 28. Detalle de las 20 capas de prismas alrededor de la superficie de la columna del Faro.

Además de definir la malla hay que definir los planos de medición, la Figura 29 muestra las características de estos planos.

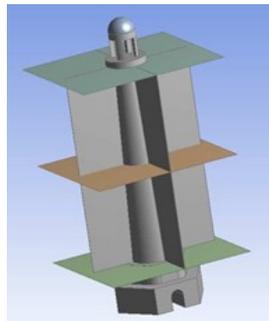


Figura 29. Planos de medición

Hay que destacar las siguientes ideas:

1. La malla básica ha sido generada a base de prueba de error, es decir, se ha elegido un tamaño nominal de tetraedros que se ha ido refinando hasta alcanzar una estabilización de resultados. Una vez estabilizados se ha fijado este tamaño como nominal. Los resultados observados son el tamaño y magnitud de la estela.
2. Se ha refinado la malla en los elementos superficiales del faro analizando la variación de la estela y del perfil de velocidades. Una vez estabilizado estos resultados se ha fijado este refinado como el refinado idóneo.
3. Para la capa límite se han tomado las decisiones del capítulo dos sobre la malla refinada anterior.

Estas tres ideas dan lugar a la siguiente nomenclatura: XY-Z,

- X: es un valor numérico que indica el detalle de la malla volumétrica, donde 1 es el valor de partida y 4 es un valor 4 veces inferior
- Y: es un valor alfabético. A indica que el modelo turbulento es K-Epsilon Realizable, B K-Epsilon Realizable, y M indica que es un caso tipo A pero además la malla superficial ha sido refinada.
- Z: toma el valor CL si se ha definido una capa límite en el faro.

### 3.1.4 Resultados

#### 3.1.4.1 Definición de casos

Los parámetros y consideraciones básicas que se han tenido en cuenta en la simulación tipo 1M-CL (caso de referencia) vienen recogidos en la Tabla 5.

<i>Modelo de energía</i>	<i>Ecuación de la energía</i>
<i>Modelo de turbulencia</i>	<i>k-epsilon Realizable (Enhanced Wall Treatment)</i>

<i>Fluido</i>	<i>Aire</i>		
<i>Condiciones de contorno de las superficies</i>	<i>Faro</i>	<i>Wall (Pared)</i>	
	<i>Túnel</i>	<i>Entrada</i>	<i>Velocidad de entrada: 2 m/s</i> <i>Temperatura constante: 300 K</i>
		<i>Salida</i>	<i>Pressure Outlet (Presión de salida)</i> <i>Presión atmosférica</i>
		<i>Lateral izquierdo</i>	<i>Symmetry (Pared)</i>
		<i>Lateral derecho</i>	<i>Symmetry (Pared)</i>
		<i>Techo</i>	<i>Symmetry (Pared)</i>
		<i>Suelo</i>	<i>Wall (Pared)</i>
<i>Método de solución (discretización espacial)</i>	<i>Green-Gauss basado en nodos</i>		
<i>Método de inicialización</i>	<i>Híbrida</i>		
<i>Número de iteraciones</i>	<i>500</i>		

**Tabla 5. Parámetros de la simulación 1M-CL**

En esta simulación se considera que la turbulencia sigue un modelo k-épsilon realizable con mejora del comportamiento en pared (Enhanced Wall Treatment), ya que se recomienda en problemas con flujos de fase única como es este caso. El modelo k-épsilon realizable presenta diferencias frente al modelo Standard, a pesar de compartir la misma ecuación de energía cinética de turbulencia.

El modelo k-épsilon realizable ofrece ventajas frente al modelo k-épsilon Standard:

- Mejora la ecuación de épsilon.
- La variable  $C_\mu$  relativa a la viscosidad turbulenta ya no es constante. En el modelo realizable, esta variable es función de las tasas de esfuerzos y rotaciones promedios de la velocidad angular de la rotación del sistema, y de los campos de turbulencia.
- Mejora los resultados obtenidos en flujos que involucra:
  - o Chorros planos o circulares (predice la difusión del chorro correctamente).
  - o Capas límite bajo fuertes gradientes de presión negativa o la separación.
  - o Rotación, recirculación.
  - o Curvaturas de líneas de corriente pronunciadas.

Tal y como se ha dicho, el resto de casos comparten las puntualizaciones anteriores salvo en la tipología del modelo de turbulento y en el refinado de la malla.

Se ha optado por un número de iteraciones de 500 que permite la convergencia de la solución durante el cálculo (Figura 30).

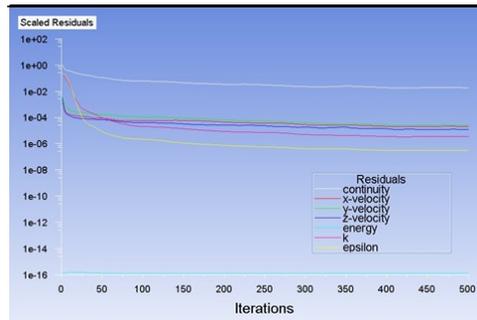


Figura 30. Convergencia de la solución para 500 iteraciones de la Simulación 1B

### 3.1.4.2 Influencia capa límite

Para analizar el efecto de la capa límite se ha generado una malla refinada y con capa límite a partir del caso nominal (1M-CL), y otro caso con el mismo número de nodos que el anterior pero sin capa límite (2M). Se ha optado por presentar estos resultados, aunque se han hecho todas las combinaciones de simulaciones, ya que la idea es demostrar el efecto de colocar bien los nodos, en este caso definiendo la capa límite

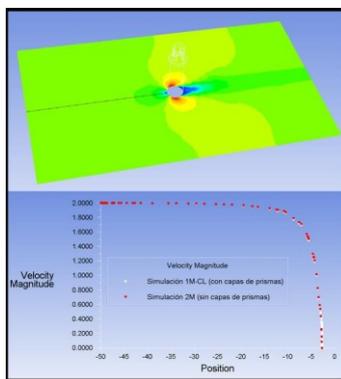


Figura 31. Gráfica de la evolución de la velocidad de la simulación

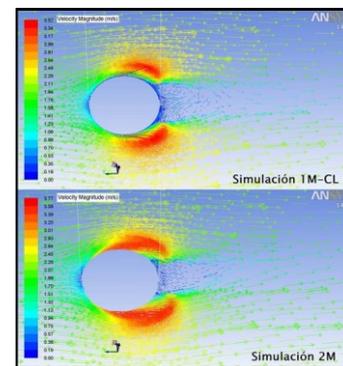


Figura 32. Detalle del desprendimiento de la capa límite y comportamiento del fluido.

La gráfica anterior muestra el campo de velocidades en el plano medio del faro, y además la evolución del módulo en la línea media que aparece representada. Se puede ver cómo existe bastante coincidencia del módulo hasta la zona cercana a la superficie (zona izquierda). Esta zona es importante para caracterizar el efecto de la presión total en el cuerpo.

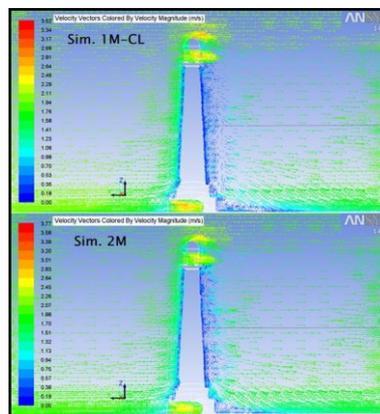


Figura 33. Evolución de las velocidades y del fluido en la estela turbulenta en el plano vertical.

### 3.1.4.3 Valición con modelo analítico de referencia.

De la literatura se sabe que el flujo ideal (no viscoso, incompresible e irrotacional) alrededor de un cilindro se representa mediante potencial complejo, Ecuación (1).

$$w = U z + \frac{a^2}{z} \quad 1$$

Por tanto, el potencial de velocidad y la función de corriente vienen dadas por las Ecuaciones (2) y (3) respectivamente:

$$\phi = U r + \frac{a^2}{r} \cos\theta \quad (2)$$

$$\varphi = U r - \frac{a^2}{r} \sin\theta \quad (3)$$

Siendo “a” el radio del cilindro (en este caso el radio de la columna), “r” la distancia del punto a estudiar al centro del cilindro, “U” la velocidad aguas arriba y “θ” el ángulo del punto a estudiar respecto al centro del cilindro. Las componentes polares de la velocidad quedan de la siguiente manera:

$$u_r = \frac{\partial\phi}{\partial r} = U \left( 1 - \frac{a^2}{r^2} \right) \cos\theta \quad (4)$$

$$u_\theta = \frac{1}{r} \frac{\partial\phi}{\partial\theta} = -U \left( 1 + \frac{a^2}{r^2} \right) \sin\theta \quad (5)$$

En la superficie del cilindro, es decir, en la superficie de la columna, se tiene que  $r=a$ , así que la velocidad viene dada por la Ecuación (6):

$$v = u_\theta \big|_{r=a} = 2U \sin\theta \quad (6)$$

La velocidad será máxima ( $v=2U$ ) para valores de  $\theta$  igual a  $\pi/2$  o  $-\pi/2$ , es decir, en los puntos de la superficie correspondientes al plano normal a la dirección del flujo que pasa por el centro de cilindro, tal y como muestra la Figura 24. Para valores  $\theta=0$  ó  $\theta=\pi$ , la velocidad es nula.

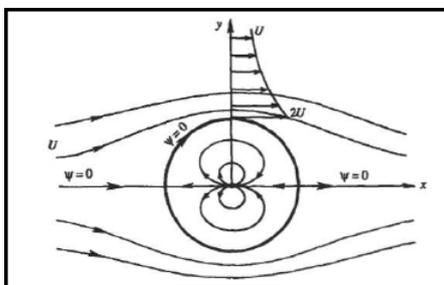


Figura 34. Flujo ideal alrededor de un cilindro sin recirculación

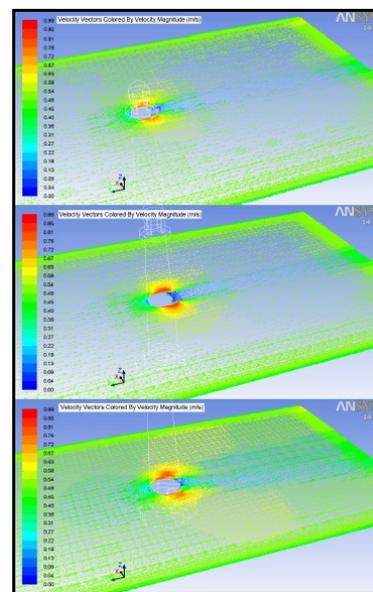


Figura 35. Vectores de velocidad en planos horizontales a 37m , 22m y a 7m, en la Simulación 1B

Cabe destacar que el flujo es menos uniforme en el plano horizontal de la base de la columna. Esto se debe a que el pedestal situado en la base de la columna alta el flujo y donde debería haber un punto de remanso (Punto A en la Figura 36) con velocidad nula, el fluido tiende a subir por la columna.

Al desprenderse la capa límite, se genera la estela turbulenta que para el caso de la base de la columna, el fluido tiende a bajar debido nuevamente a la influencia del pedestal.

Como cabía esperar según la Ecuación (6) y la Figura 34, las velocidades máximas tienen lugar en los

puntos de corte del plano vertical normal a la dirección del fluido (dibujado en la Figura 31) con la superficie de la columna. Un ejemplo de ello se muestra en la Figura 36, donde los Puntos B y C son dónde se da la máxima velocidad alrededor del cilindro. El Punto A constituye el punto de estancamiento en el cual la velocidad es nula (o casi nula).

Se comprueba además que la velocidad real no se comporta como la velocidad teórica de la Ecuación (6) ya que, debido al desprendimiento de la capa límite en la zona posterior de la columna, existen numerosos puntos con velocidad nula (zona D de la Figura 36) y no un solo punto teórico.

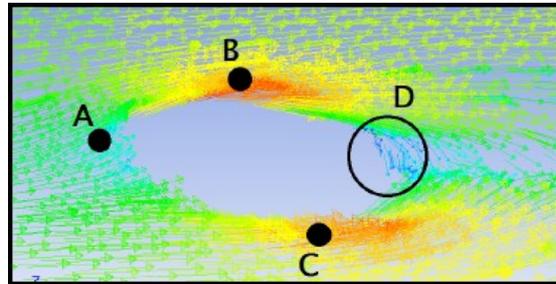


Figura 36. Vectores de velocidad en el plano horizontal a 7m del suelo para 0.5 m/s.

Según la teoría, para un fluido ideal no viscoso, incompresible e irrotacional, que fluye alrededor de un cilindro, se tiene que la velocidad en la superficie de dicho cilindro viene dada por la Ecuación (6) como se demostró en la Simulación

En la realidad se comprueba que si es cierto que las velocidades máximas se dan en los laterales del Faro y que es nula en el frontal y la zona trasera. Sin embargo, la velocidad máxima no es el doble que la de entrada, ya que el fluido no se comporta de manera ideal y se ve afectado por los fenómenos de viscosidad y capa límite que desaceleran al fluido.

#### 3.1.4.4 Capa límite hidrodinámica

Además, sobre el caso 1M-CL, se ha realizado un estudio de la evolución del perfil de velocidad en diferentes líneas de 3 cm normales a la superficie que bordean la columna del Faro a una altura constante de 22 m (mitad de la columna). Cada línea se ha tomado con incrementos de  $10^\circ$  y sólo se ha analizado la mitad de la sección de la columna debido a la simetría de los resultados.

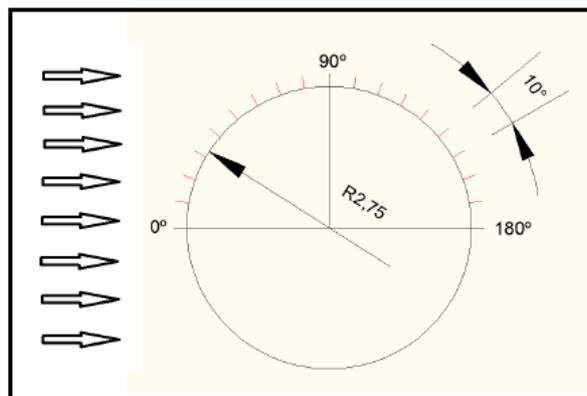
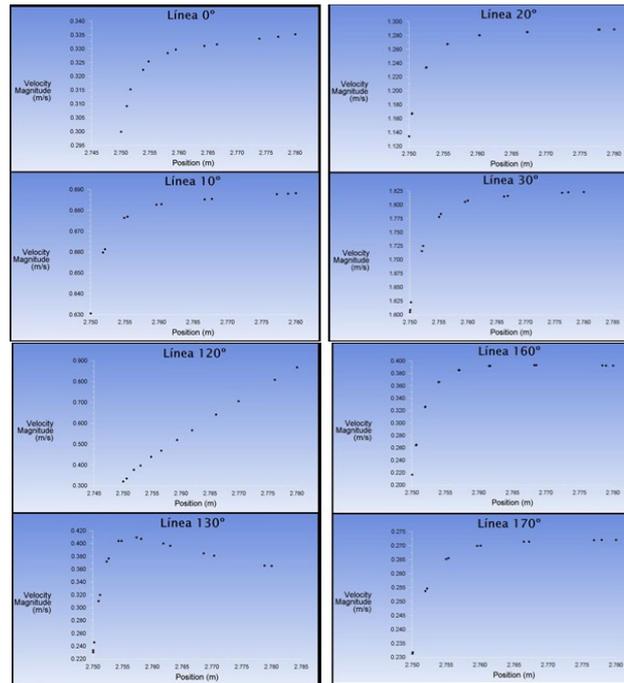


Figura 37. Metodo para el analisis del perfil de velocidades y el desprendimiento de la capa límite.



**Figura 38. Graficas de los perfiles de velocidades que detallan los valores que adquiere la velocidad**

Se observa en la Figura 38, el decremento notable de velocidad en las líneas 110° y 120°. Esto es debido a que entre esas dos líneas tiene lugar el desprendimiento de la capa límite. A partir del desprendimiento de la capa límite se forma la estela turbulenta con la disminución de la velocidad que conlleva (líneas a 130°, 140°, 150°, 160°, 170° y 180°). La línea a 130° representa el inicio de la formación de la estela turbulenta, en la que como consecuencia de los vértices iniciales, tiene un comportamiento irregular en lo concerniente a velocidades. Las velocidades van disminuyendo a medida que las líneas se aproximan a 180° siendo mínimas y llegando a ser casi nulas a 180° (justo en la parte trasera de la columna del Faro).

La estela presenta un comportamiento uniforme (líneas a 140°, 150°, 160°, 170° y 180°) llegando a estabilizarse y mantener una velocidad determinada con variaciones mínimas, tan sólo la línea a 130°, en la formación de la estela, se presentan valores irregulares de velocidades.

Este resultado pretende saber de manera aproximada dónde se realiza el desprendimiento de la capa límite, y con ella el cambio entre la zona barlovento, tangente y sotavento. Conocer la capa límite hidrodinámica permite tener seguridad con respecto al cálculo del coeficiente de presiones objetivado.

### 3.1.4.5 Campo de presiones

Conocida la capa límite hidrodinámica, y con cierta tranquilidad en la calidad del modelo y de la malla 1M-CL, se procede al cálculo del campo de presiones.

Las presiones totales (Figura 39 y Figura 40), suma de presiones dinámicas y estáticas, se ven reducidas en la estela turbulenta. A mayor proximidad a la superficie, menores son las presiones totales en la estela, siendo mínimas en la parte trasera de la superficie columna. Llegan a ser negativas en ciertas zonas de la superficie trasera del Faro produciendo efecto de succión.

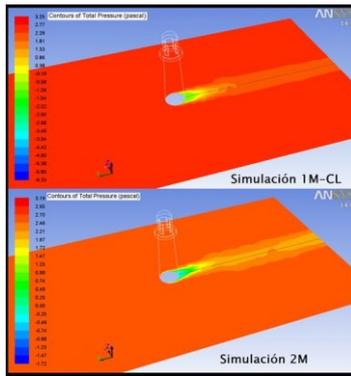


Figura 39. Contorno de presiones en el plano horizontal para la Simulación 1M-CL y 2M

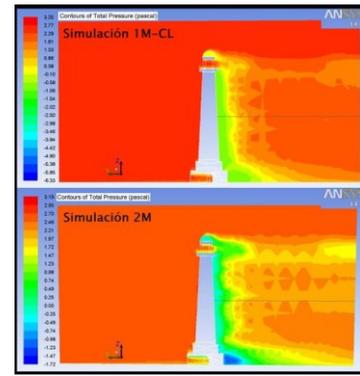


Figura 40. Contorno de presiones totales en el plano vertical para la simulación 1M-CL y 2M

Las presiones totales representadas en la Simulación 1M-CL son más precisas que las representadas en la Simulación 2M, debido un modelo con mejor refinado mediante 20 capas de prismas alrededor de la superficie de la columna.

### 3.1.4.6 Cálculo de CP

El coeficiente de presiones viene dado por la Ecuación 7:

$$C_p = \frac{p - p_\infty}{\frac{1}{2} \rho U^2} = 1 - \frac{v^2}{U^2} \quad (7)$$

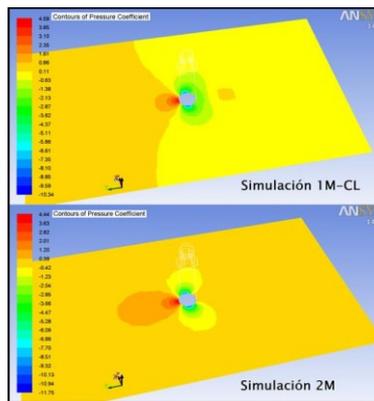


Figura 41. Distribución de presiones (Cp) en el plano horizontal que corta la columna por la mitad.

El coeficiente de presiones está vinculado al movimiento del arie, es por ello que aparecen diferencias entre ambas casos.

Por último, este gráfico puede ser traducido a valores, pudiendo obtener el valor del cp en toda la envuelta del faro.

### 3.1.4.7 Influencia de la malla volumétrica

Por último se muestra uno de los estudios para demostrar la inutilidad de mallar refinado el volumen del túnel de viento sin prestar detalle al comportamiento superficial del faro. Para ello se comparan los casos nominal 1ª, con el refinado 1M, y con un caso 4B con un tamaño de malla volumétrica 4 veces inferior (número de nodos al cuadrado). (Figura 42).

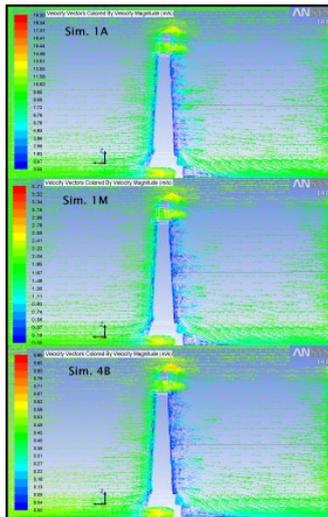


Figura 42. Evolución de las velocidades y estela turbulenta en el plano vertical por la mitad

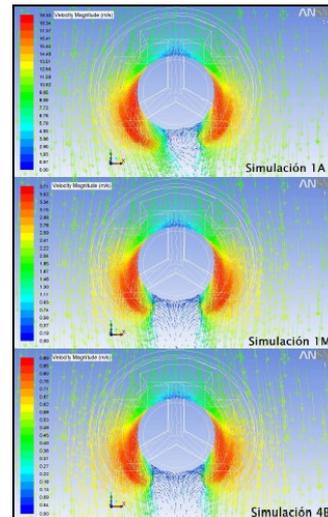


Figura 43. Detalle del desprendimiento de la capa límite y comportamiento del fluido, 1M y 4B.

A pesar del notable aumento en los valores de las velocidades de una de una Simulación respecto a otra, cabe destacar que la evolución del perfil de velocidades de la estela turbulenta, medido a lo largo de una recta en el plano vertical que corta a la columna por la mitad (sentido de la corriente), sigue un patrón similar para velocidades de entrada medias (2 m/s) y bajas (0.5 m/s). Para altas velocidades, la estela no se comporta de manera similar.

### 3.1.4.8 Conclusiones

La aplicación recorre todos los problemas que se pueden tener en el procedimiento a la hora de calcular los coeficientes de presiones en un edificio, pero intenta servir de ejemplo de los conocimientos adquiridos durante el desarrollo del procedimiento del capítulo dos. Entre éstos destacan:

- La importancia de la elección del modelo turbulento y el tratamiento de pared para la resolución de la aerodinámica. Actualmente las publicaciones y trabajos centran su uso al cálculo de coeficientes de transferencia convectiva, pero se puede observar que es importante para calcular bien el efecto del rozamiento.
- El refinado de malla en las superficies a estudio y colindantes es totalmente necesario. Es recomendable la definición de la capa límite, pero en su defecto el refinamiento. Esto es así porque en geometrías complicadas como barrios o ciudades puede ser inviable la definición de la capa límite.
- Por último, es conveniente realizar un análisis de malla, es decir, variar la malla hasta estabilizar los resultados obtenidos con la misma.

## 3.2 APLICACIÓN 2: CÁLCULO DE COEFICIENTES DE TRANSFERENCIA CONVECTIVA

### 3.2.1 Descripción

En esta aplicación se calcula el Nusselt en el interior de conductos a partir de simulaciones en ANSYS CFD FLUENT. Entre los principales asuntos estudiados se encuentran:

- Análisis y requerimientos de malla: calidad exigida.
- Flujo turbulento y laminar en convección forzada.
- Metodología de cálculo de coeficientes de película
- Comparativa de valores calculados con los presentes en la literatura
- Problemas acometidos y vías de resolución

De forma más concreta, el objetivo primero de este trabajo es crear una metodología de análisis CFD de cálculo de Nusselt en los muros de edificios, tanto desde el punto de vista del requerimiento de malla como del procedimiento de cálculo numérico.

En esta aplicación se estudia un conducto circular por el que circula un flujo de aire con propiedades constante. A continuación se muestra un esquema en el que se describe la física del problema analizado.

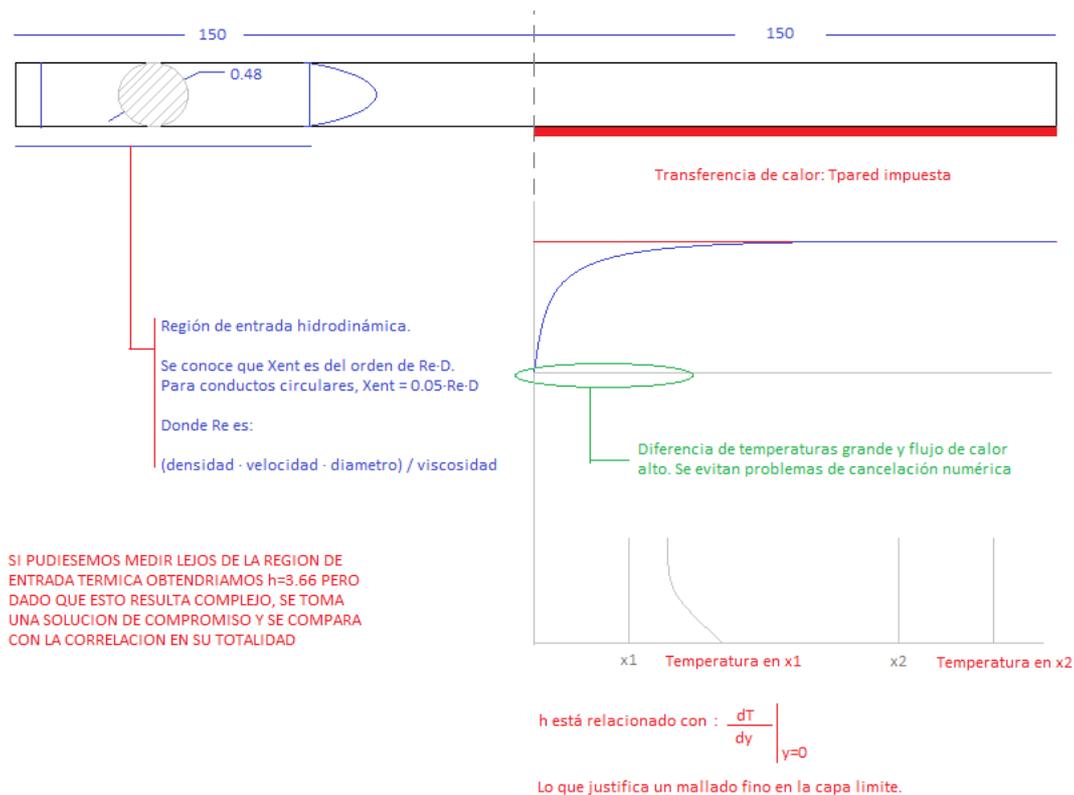


Figura 44: Esquema del estudio realizado

Como se observa en la Figura, el estudio se lleva a cabo en un conducto circular de 300m de largo y 0.48m de diámetro que se encuentra dividido en dos regiones. La primera región donde el flujo se desarrolla hidrodinámicamente partiendo desde un perfil plano y el segundo tramo donde este incrementa su temperatura.

Es importante destacar que cuando se emplean las correlaciones, estas cuentan con un perfil completamente desarrollado hidrodinámicamente y por ello se hace necesaria esta primera región.

Una vez desarrollado el perfil de velocidades, se entra en la región de entrada térmica. Esta corresponde con la zona en la que el flujo se calienta con intensidad. Se caracteriza por tener un valor del Nusselt fuertemente variable. Posteriormente, el Nusselt se acerca a una asíntota que se vislumbra con dificultad en el experimento

realizado, puesto que se necesitaría una longitud de tubo larga con el fluido todavía transfiriendo calor. Pero, dado que el flujo alcanza la temperatura de la pared, es difícil encontrar el valor de  $Nu = 3.66$  que predice la teoría para  $L \gg D$ .

Existen también correlaciones para el caso en el que tanto la capa límite hidráulica como la térmica se desarrollan simultáneamente pero no se ha elegido esa opción porque complicaría notablemente el problema.

De acuerdo con estas premisas, se toma la geometría, se malla y se elabora un modelo de Fluent. Se compara con la correlación 25 para el caso de flujos laminares y con la correlación 27 para casos turbulentos, para así corroborar la estrategia de mallado.

### 3.2.2 Modelización

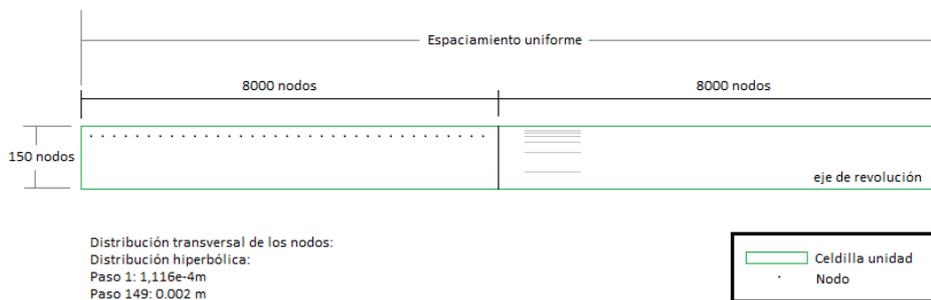
#### 3.2.2.1 Geometría

Se resuelven dos geometrías diferentes: un conducto circular y un conducto formado por dos placas paralelas infinitamente anchas.

#### 3.2.2.2 Malla

La malla es uno de los elementos principales en los que se apoya el motor de cálculo de FLUENT, por lo que un buen mallado es necesario para obtener buenos resultados. Tras varias pruebas, se propone como malla de partida una malla plana de celdilla unidad rectangular.

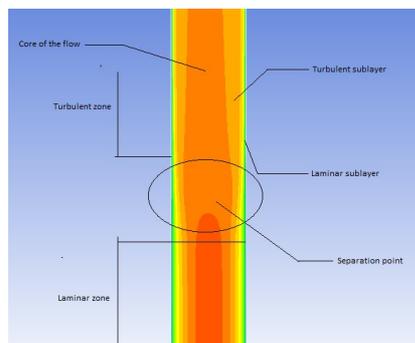
De este modo, el problema se resuelve asumiendo que se trata de un problema axial simétrico.



**Figura 45: Esquema de la malla**

Esta malla es factible para un modelo 2D, pero debe ser optimizada para resolver casos tridimensionales, no obstante, esboza la idea en la que se debe basar el nuevo mallado.

La validación de esta malla se lleva a cabo tanto de forma visual como de forma numérica. Se realizan diferentes simulaciones obteniéndose muy buenos resultados cuando se analiza el régimen laminar, lo que, junto con la visualización de la solución, nos incita a pensar que la malla es suficientemente fina como para aceptarla como válida.



**Figura 46. Transición a la turbulencia en régimen turbulento**

En régimen turbulento se representa la intensidad de turbulencia observándose el punto de separación de la

capa límite, la subcapa laminar y la turbulenta.

### 3.2.3 Resultados CFD

#### 3.2.3.1 Aspectos generales

En este apartado se detallan los aspectos generales asociados a los modelos resueltos, esto es, el número de Reynolds y el Número de Nusselt particularizado para las dos geometrías impuestas. A la par se define la región de entrada.

Básicamente se pueden distinguir dos tipos de regiones de entrada cuyas dimensiones son diferentes según la geometría del conducto y según se trabaje en régimen laminar o turbulento. Estas dos regiones son:

- Entrada hidrodinámica: se trata de la longitud que requiere el fluido para que se desarrolle su perfil de velocidades.
  - o En caso laminar, para conducto circular: aproximadamente  $0.05 \text{ Re } D$ .
  - o En caso turbulento, la solución no es tan clara pero existen formulas que permiten estimarla con cierta calidad aunque un estudio preciso requiere inspección visual.
- Entrada térmica: se trata de la longitud que necesita el fluido para alcanzar la temperatura de la pared cuando ésta queda impuesta como condición de contorno.
  - o En caso laminar, conducto circular,; aproximadamente  $0.05 \cdot \text{Re} \cdot D \cdot \text{Pr}$ .
  - o En caso turbulento, debe estudiarse por inspección.

#### 3.2.3.2 Conducto circular

Los números adimensionales necesarios para el estudio que se persigue son:

- **Número de Reynolds:**

$Re_D$ : número de Reynolds, evaluado como:

$$Re_D = \frac{\rho \cdot U \cdot D}{\mu}$$

Donde:

$\rho$ : densidad del fluido en las condiciones de trabajo.

$U$ : velocidad del fluido calculada como el caudal circulante entre el área de paso. Debe corresponder con el valor introducido a FLUENT.

$D$ : diámetro del conducto

$\mu$ : viscosidad del fluido

- **Número de Nusselt:**

$Nu$ : número de Nusselt del que se calcula un coeficiente de película  $h$ .

$$Nu = h \cdot D / k$$

$D$ : diámetro del conducto

$K$ : conductividad del fluido. (No confundir con la conductividad del tubo)

$h$ : es el coeficiente global de transferencia de calor que debe ser entendido como sigue:

$$h = \frac{G \cdot h_{mmx} - h_{mmo}}{A \cdot \frac{T_{mmx} - T_{pared} - T_{mmo} - T_{pared}}{\ln \frac{T_{mmx} - T_{pared}}{T_{mmo} - T_{pared}}}}$$

Donde:

G: flujo másico

hmm x: entalpía medida de masa en la sección x

hmm 0: entalpía media de masa en la sección dónde comienza a transferirse calor. (Mejor tomar lectura un poco antes puesto que al no transferirse calor, el valor de la entalpía es el mismo)

Tmm x: temperatura media de masa en la sección x

Tmm 0: temperatura media de masa en el punto donde comienza a transferirse calor.

Tpared: temperatura de la pared.

A: área de intercambio de calor.

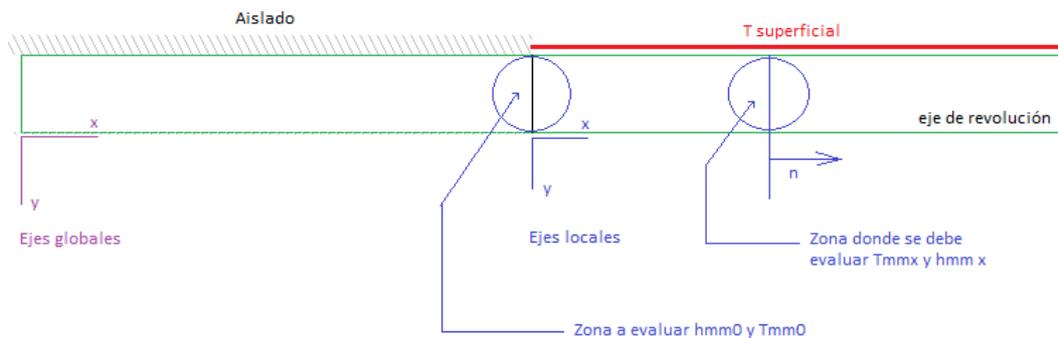


Figura 47. Esquema conducto circular

### Región de entrada:

En este apartado se propone una expresión con la que la longitud de la región de entrada puede ser estimada.

$$1.3 \cdot Re^{1/4} \cdot D < Le < 2 \cdot Re^{1/4} \cdot D$$

Puesto que se trata de una estimación, esta expresión arroja como resultado un intervalo dentro del cual se debe alcanzar la adaptación del flujo.

A modo ilustrativo, se realiza una inspección visual y se compara el resultado con esta fórmula para la estimación de la longitud de entrada en un conducto circular flujo interno con un Reynolds de  $6.3 \cdot 10^4$ .

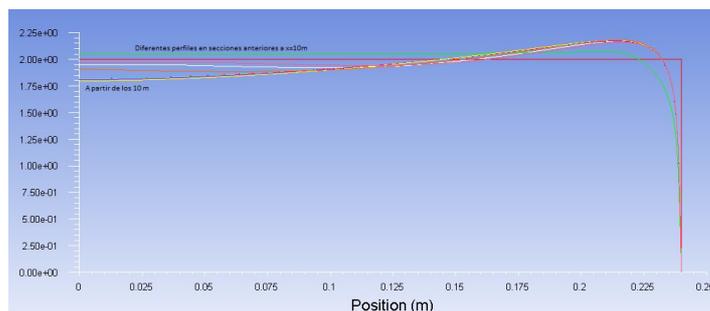


Figura 48: perfiles de velocidades  $Re\ 63e+4$

De esta inspección visual se puede intuir que la región de entrada hidrodinámica mide aproximadamente 10 metros.

A la vez, para comparar con la expresión descrita en al comienzo, se evalúa esta fórmula obteniéndose que la longitud de entrada debe encontrarse en el intervalo  $9.88m < Le < 15m$ .

Como se puede ver, se cumple este criterio y el rango está bastante acotado con una exactitud razonable.

### Propiedades:

Para el problema resuelto se han impuesto:

Pr: Prandtl del fluido: 0.7296  
 Densidad: 1.18Kg/m<sup>3</sup>  
 Viscosidad: 1.18 · 10<sup>-5</sup>  
 Capacidad calorífica (Cp): 1007 J/KgK  
 Conductividad térmica: 0.02551 W/mK

Datos obtenidos de FLUENT y comparación con la correlación.

De acuerdo con la estrategia planteada, se lanzan dos casos laminares, uno con un Re de 315 y otro con un Re de 947.

**NOTA:** todas estas propiedades son dependientes de la temperatura, y dado que es necesario resolver el problema térmico para comparar resultados, lo mejor es imponer propiedades constantes con la temperatura.

### 3.2.3.3 Placas planas

De forma análoga al procedimiento empleado para el conducto circular, se dispone un conducto formado por dos placas paralelas divididas en dos regiones: una primera región en la que el flujo se desarrolla hidrodinámicamente y otra en la que se transfiere calor.



Figura 49. Esquema placa plana.

Los parámetros empleados son idénticos aunque deben particularizarse para la geometría desarrollada.

#### **Número de Reynolds:**

Re<sub>D</sub>: número de Reynolds, evaluado como:

$$Re_e = \frac{\rho \cdot U \cdot 2 \cdot e}{\mu}$$

Donde:

ρ: densidad del fluido en las condiciones de trabajo.

U: velocidad del fluido calculada como el caudal circulante entre el área de paso. Debe corresponder con el valor introducido a FLUENT.

e: ancho del conducto

μ: viscosidad del fluido

#### **Número de Nusselt:**

Nu: número de Nusselt del que se calcula un coeficiente de película h.

$$Nu = h \cdot 2 \cdot e / k$$

Donde:

e: ancho del conducto

K: conductividad del fluido. (No confundir con la conductividad del tubo)

h: es el coeficiente global de transferencia de calor

### 3.2.3.4 Caso 1: Conducto circular flujo laminar

En este apartado se resuelve un conducto circular en régimen laminar con FLUENT. Para realizar la comparación de resultados, se usará como modelo de referencia los resultados de la correlación 25 de las tablas de la asignatura de “Transmisión de Calor”, las cuales podemos encontrar en el **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**

La ecuación que rige el modelo de referencia elegido es la siguiente:

$$\overline{Nu_D} = 3.66 + \frac{0.0668(D/L)Re_D Pr}{1 + 0.04[(D/L)Re_D Pr]^{2/3}}$$

Se obtiene un Nusselt medio entre el punto de comienzo de la transferencia de calor y el punto en el que se quiere evaluar el Nusselt. Parte de la hipótesis es que el flujo está hidrodinámicamente desarrollado, es decir, cuando se comienza a transferir calor existe un perfil de velocidades de Hagen Poiseuille. Asumen que la temperatura de la pared es constante.

Se resuelve para dos números de Reynolds diferentes cuyos valores son: 947 y 315 para una velocidad de entrada de 0.2m/s y 0.1m/s respectivamente.

#### 3.2.3.4.1 Resultados

A continuación se muestran los resultados obtenidos de las simulaciones.

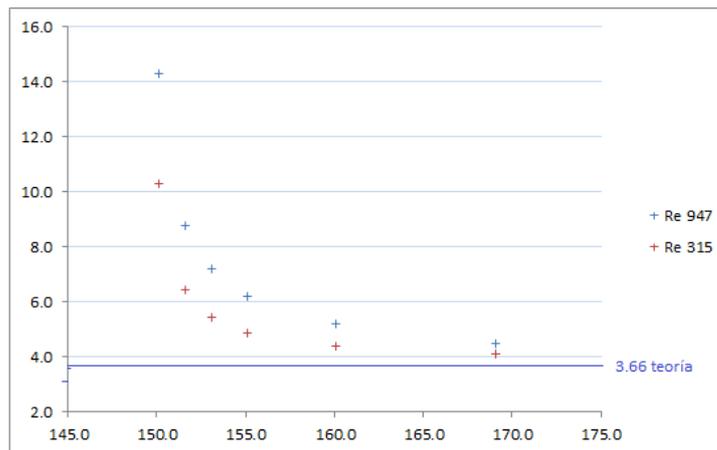


Figura 50: Nusselt frente a la posición

En el gráfico se observa una clara tendencia del número de Nusselt a alcanzar una asíntota horizontal.

Se observa que tan solo se representan valores de Nusselt a partir de x=150m porque para valores inferiores el conducto está aislado.

A continuación se comparan con los valores de la correlación:

Re	x	Nu Fluent	Nu correlación
315	160.1	4.302	4.271
315	169.1	4.112	4.003
947	160.1	5.175	5.216
947	169.1	4.498	4.575

Tabla 6. Comparación Nu Caso 1

### 3.2.3.5 Caso 2: Conducto circular flujo turbulento

En este apartado se resuelve un conducto circular en régimen turbulento, como modelo de referencia se usa la correlación 27 de las tablas comentadas con anterioridad.

La ecuación que rige el modelo de referencia elegido es la siguiente:

$$Nu_D = 0.023 Re_D^{4/5} Pr^n$$

Se obtiene el número de Nusselt para flujo turbulento completamente desarrollado con un número de Reynolds mayor de 10000 y un Prandtl entre 0.6 y 160.

Bajo estas hipótesis, y asumiendo de nuevo propiedades constantes con la temperatura e iguales a las impuestas en el caso laminar, se lanza un nuevo caso de FLUENT con un modelo turbulento.

#### 3.2.3.5.1 Resultados

En este caso, dada las dificultades encontradas, no ha sido posible realizar un estudio de Nu frente a x aunque si se muestra una tabla donde se compara el valor de Nu leído en FLUENT con el valor calculado a través de la correlación.

Re	x	Nu Fluent	Nu correlación
10 <sup>5</sup>	169.1	194.70	199.41
94400	169.1	182.19	190.40
62933	169.1	134.56	137.68

Tabla 7. Comparación Nu Caso 2

Para la extracción de estos resultados se han realizado diferentes simulaciones y aunque muchas arrojan valores muy alejados de las correlaciones, se ha profundizado en que la solución podría venir de utilizar una función de pared que focalice en los efectos térmicos.

De este modo, se ha realizado una simulación en la que en primer lugar se ha resuelto el problema utilizando un modelo K-ε cuya solución mejora en un segundo paso activando estas funciones de pared (Wall function).

Tras realizar varias simulaciones, se observa que para la solución del problema expuesto resulta necesario por tanto, resolver inicialmente el problema sin activar las Wall functions y luego hacer uso de las funciones de pared de FLUENT.

### 3.2.3.6 Caso 3: Placas paralelas flujo laminar

En este apartado se realiza un cálculo análogo al presentado para el conducto circular. Para ello, se toma un conducto formado por dos placas paralelas y empleando una malla similar a la empleada para el conducto circular. Se impone de nuevo una región adiabática suficientemente larga como para que el flujo se desarrolle y otra de transferencia de calor donde se calculan los números de Nusselt medio para diferentes secciones.

En el caso de flujo laminar existe, además de solución analítica para el problema de placas paralelas tanto a temperatura constante como a flujo de calor constante, gran cantidad de publicaciones en la literatura.

Para el caso en régimen laminar y considerando la región totalmente desarrollada hidrodinámica y térmicamente, el problema puede resolverse de manera analítica. Se tiene que, en el caso del problema de tuberías, el número de Nusselt es una constante independiente del Pr, del  $Re_D$  y de la posición en el eje y [15, p. 440]. En este caso la temperatura de referencia que se emplea en la ley de enfriamiento de Newton viene dada por  $T_m$ , que representa en cada sección del canal la temperatura media que debe tener el fluido para transportar la misma cantidad de energía térmica por esa sección. Esta temperatura media varía en la dirección del flujo.

Para el caso de la geometría de placas paralelas isoterma y dependiendo de la relación de aspecto b/L se tiene, de manera análoga al caso de tuberías, un número de Nusselt constante [15, p. 450]

Sección transversal	b/a	Nu
	1	2.98
	1.43	3.08
	2	3.39
	3	3.96
	4	4.44
	8	5.60
	$\infty$	7.54

Tabla 8. Relación b/L con Un

### 3.2.3.6.1 Resultados

En este apartado se muestran los resultados obtenidos del estudio realizado sobre placas planas paralelas.

Re	x	Nu Fluent	Nu correlación
1973	0-4m	11.09	7.54
1973	70-120m	7.84	7.54
986	0-4m	9.78	7.54
986	70-120m	7.25	7.54

Tabla 9. Comparación Nu Caso 3

Se observa que, cuando tomamos una media focalizando solo en la región de entrada, los valores de Nu son más elevados que la solución teórica para flujo completamente desarrollado. Pero cuando se toman medias en regiones algo más alejadas, los valores tienden a ser similares.

### 3.2.3.7 Caso 4: Placas paralelas flujo turbulento

En este apartado se muestran los resultados obtenidos para un Reynolds de  $6,3e+4$  para el caso de dos placas planas infinitas y paralelas.

Los resultados se muestran en la siguiente tabla:

Re	x	Nu Fluent	Nu correlación de Petucov	Nu correlacion de Kays & Crawford
75500	150m-169.1m	161	138	143

Tabla 10. Comparación Nu Caso 4

## 3.2.4 Conclusiones

Los escollos superados son:

- Conocimiento de la capa límite: modelización y mallado
- Cálculo de coeficiente de transferencia convectiva como valor representativo de una superficie.
- Análisis de la región de entrada y.

### 3.3 APLICACIÓN 3: CARACTERIZACIÓN DE PATRONES DE FLUJO

#### 3.3.1 Descripción

Esta aplicación tiene como objetivo demostrar qué metodología es válida para la caracterización de patrones de flujo. Esta caracterización permitirá conocer cómo se mueve el aire en el interior de locales, con una entrada o salida forzada, bien por medio natural, mecánico o híbrido. Para ello se ha elegido el estudio de un salón de un piso de VPO de Málaga. Sobre este edificio se realiza una batería de casos con diferentes configuraciones de huecos de entrada para obtener la disposición de estos que hagan que la ventilación del recinto sea máxima. La motivación de la realización de dicho estudio se basa en la validación de esta variante del protocolo hacia el campo de los análisis semi-cuantitativos, en la que los valores arrojados tendrán valor a nivel comparativo entre los mismos (tanto mayor/menor que la referencia).



Figura 51. Imagen exterior del edificio bajo reforma



Figura 52. Imagen de la fachada Este del edificio de las viviendas estudiadas.

A su vez, el caso planteado forma parte de un proyecto de reforma de un conjunto de viviendas de protección oficial pertenecientes al Ayuntamiento de Málaga. Este proyecto (Proyecto RS), se lleva a cabo conjuntamente con el Ayuntamiento de Málaga y la constructora FCC.

El edificio se encuentra situado en la Av. Jacinto Benavente y consta de 140 viviendas, las cuales muestran varias configuraciones y orientaciones. No obstante, se estudiará la vivienda de Tipo A, ya que es la más numerosa.

#### 3.3.2 Efecto del viento-condiciones de contorno

Se necesitan condiciones de contorno en presión. En la primera aplicación se han obtenido estas condiciones de contorno a partir de un túnel de viento, pero en esta, por tener una geometría exterior bastante irregular y desconocida, se ha optado por la opción aproximada.

La opción aproximada implica el siguiente proceso:

- 1.- Determinación de orientación del edificio.
- 2.- Determinación de la dirección e intensidad del viento Característica (Rosa de vientos).
- 3.- Cálculo del coeficiente de presión en forma vectorial aplicado a cada hueco.

Estas condiciones de contorno pueden ser en componentes x,y,z calculadas a partir de la velocidad en cada dirección, o bien un valor de la presión y unas dirección de entrada/salida fijada en las aberturas. En el caso a estudio se acuerda la opción primera por ser más sencilla, ya que proyecta la velocidad del viento en la componente normal y tangente de la abertura.

Para determinar la condición de presión que genera el viento sobre los huecos de la fachada se debe utilizar la siguiente definición:

$$\Delta P_{VIENTO} = \frac{1}{2} C_p \rho v^2$$

Donde  $C_p$  representa el coeficiente de presión en función de la dirección de incidencia del vector viento respecto a la fachada. Así, bajo la descomposición de dicha dirección relativa en un sistema de coordenadas contenido en un plano normal a la fachada, se deben realizar las siguientes distinciones.

**Cp Barlovento “0.3”.** La componente de barlovento está referida al efecto del viento en la dirección normal a la superficie.

**Cp tangente “0.1”.** Este Cp es utilizado en la componente del viento tangencial a la superficie. Como se puede apreciar el valor de Cp es menor que en barlovento ya que la presión generada por este efecto en el hueco de la fachada es menor.

**Cp Sotavento.** Este efecto está relacionado con la succión producida en la cara opuesta a la fachada en la que incide el viento y tendría por ello un valor negativo. No obstante, en este caso en particular dicha cara opuesta se encuentra resguardada, por lo que se supone una presión ambiente sin efecto de vientos.

Para la velocidad del viento se analiza la rosa de vientos del lugar. Hay que coger la velocidad en cada una de las direcciones (normal y tangente) referidas a cada abertura. La siguiente figura muestra para una serie de aberturas limitadas por líneas verticales sobre la horizontal, las componentes de la velocidad del viento que se necesitan en modulo: velocidad normal y tangente (modulo y dirección) de las velocidades anuales más probables en cada orientación.

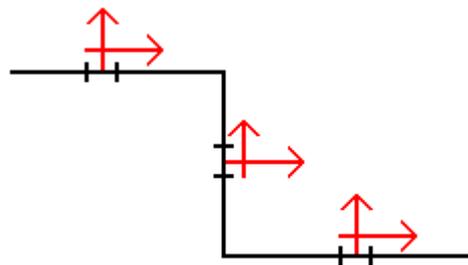


Figura 53. Componentes de la velocidad del viento

Para ello se coge las velocidades de viento promedio anual de manera aproximada a partir de la rosa de vientos.

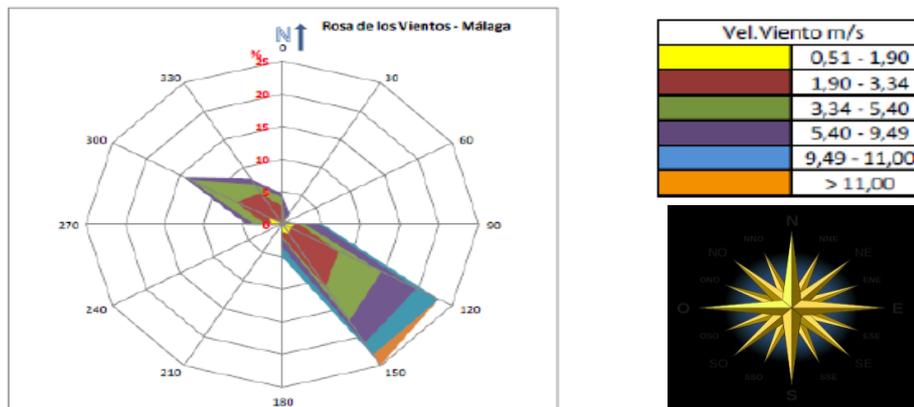


Figura 54. Orientación eólica dominante Málaga [16]

En el edificio el viento predominante tiene dirección NO y SE, por lo que habría que establecer las condiciones de contorno variables en función del caso a estudio. No obstante, en el edificio no existen entradas situadas en SE, por lo que la única dirección a estudio es la NO. Para esta dirección, se puede tomar 4 m/s la velocidad promedio, ya que la franja verde es la dominante. Por tanto, modulo del viento 4 m/s en dirección NO.

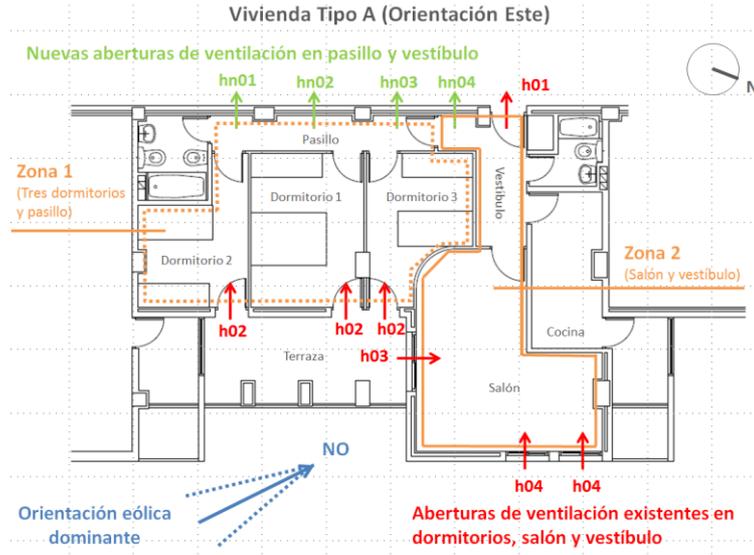


Figura 55. Plano de la vivienda con las separaciones realizadas y la señalización de los huecos

Este módulo de velocidad 4 m/s con un ángulo de 45° con respecto a la horizontal, se descompone en normal y tangente para cuantificar la presión positiva que ponemos en la inlet.

Se toman las ventanas abiertas, y las puertas correderas sólo una de las hojas abiertas. Además la succión en el pasillo puede ser mayorada si se tiene en cuenta que está en una zona SE con viento predominante en el lugar.

En FLUENT quedaría:

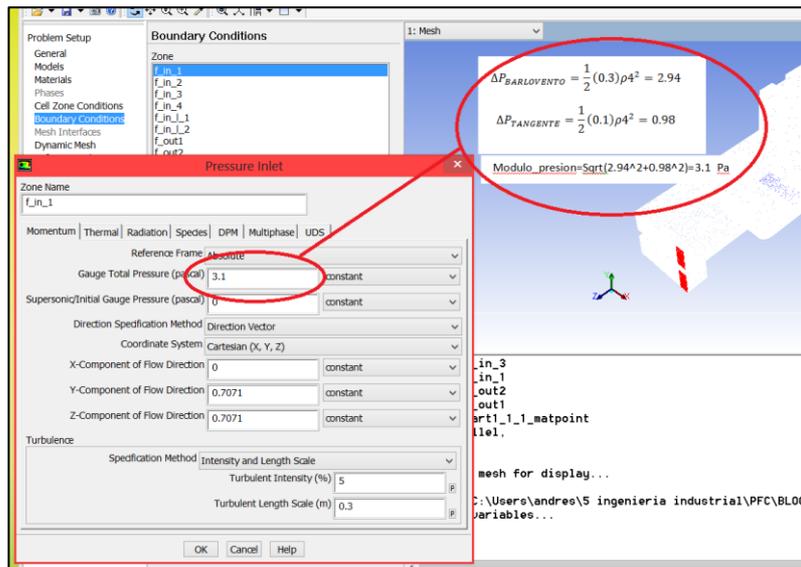


Figura 56. Capturas de la implementación en FLUENT

Se introduce el módulo de la presión en la ventana, y se imponen unas direcciones se succión. Bien en cartesinas, o simplemente se elige la opción normal y tangencial. La figura da una idea del trabajo realizado en cada entrada

Los resultados finales de los cálculos para cada hueco resultan:

$$v_{barlovento} = v_{tangente} = \frac{4 \text{ m/s}}{\sqrt{2}} = 2.828 \text{ m/s}$$

$$\Delta P_{BARLOVENTO} = \frac{1}{2} \cdot 0.3 \cdot \rho \cdot 2.828^2 = 1.4696 \text{ Pa}$$

$$\Delta P_{TANGENTE} = \frac{1}{2} \cdot 0.1 \cdot \rho \cdot 2.828^2 = 0.4898 \text{ Pa}$$

Componentes de presión (vectorial)	Valor numérico
$p_{barlovento}$	0.9487
$p_{tangente}$	0.3162
$p$	$\sqrt{1.4696^2 + 0.4898^2} = 1.549 Pa$

Tabla 11. Componentes de la condición de contorno impuesta por el viento incidente en la fachada.

Con esto ya se tienen determinadas las condiciones de contorno en los huecos de entrada. Por otra parte, en los huecos de salida, al no estar totalmente expuestos al exterior, no se consideran los efectos de succión, y se determina una condición de presión ambiente.

Las condiciones turbulentas impuestas en las condiciones de contorno serán las mismas que en casos anteriores

### 3.3.3 Definición de los casos

Se realiza a continuación el planteamiento del problema real en el que es necesario determinar, tanto la geometría de las viviendas Tipo A, como las condiciones de contorno que determinan el nivel de ventilación de la vivienda.

Es necesario comentar que se todas las posibles variantes se basan en una solución de ventilación natural cruzada en la vivienda, por lo que la primera modificación a realizar será la apertura de huecos de salida, tal y como se muestra en el apartado “Geometría”.

#### 3.3.3.1 Geometría

Además de la apertura de huecos de salida para establecer una ventilación natural cruzada, resulta evidente, tras la disposición mostrada, que se puede dividir el volumen de control en 3 zonas diferentes. (Ver figura 45)

**Zona 1:** Comprende la zona del Salón y el tramo de pasillo correspondiente hasta la evacuación del aire. En este caso la entrada de ventilación serían las ventanas y puerta de la terraza.

**Zona 2:** Resulta de la ventilación de los Dormitorios 1 y 3 y su correspondiente franja de pasillo, entendiéndose que el aire entra por los huecos en fachada de esta, y sale por los hn’s.

**Zona 3:** Resulta de la ventilación del Dormitorio 2 y el pasillo, circulando así el aire desde h02 a hn01. Además, sería conveniente el cambio de la puerta intermedia, hacia la derecha, donde limitaría la Zona 1 a la especificada.

Así por tanto, se realizará el estudio diferenciado por zonas, donde la Zona 3, no será estudiada debido al poco interés que presenta (tiro recto).

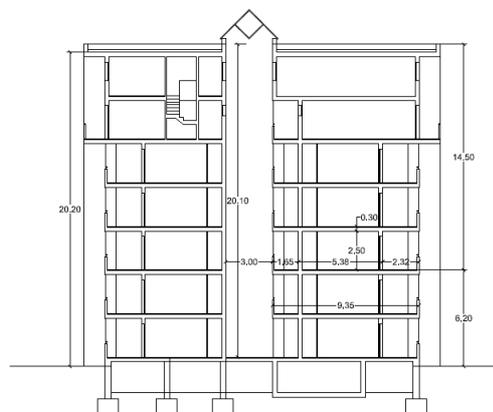


Figura 57. Plano del perfil del edificio

Una vez determinada la geometría, las zonas de estudio (Zona 1 y 2) y las condiciones operacionales que se establecen para dicho caso, resulta necesario el análisis previo de las diferentes configuraciones de huecos en fachada para estudiar posteriormente cuales resultan de mayor interés.

- Salón

Se muestran a continuación los posibles huecos a combinar de las viviendas Tipo A, observándose que para la fachada Este, se tienen dos ventanas con hojas correderas, lo cual hace que las configuraciones posibles sean de una sola hoja abierta por ventana. Lo mismo ocurre en la fachada sur, en la que existe una puerta de hoja corredera.

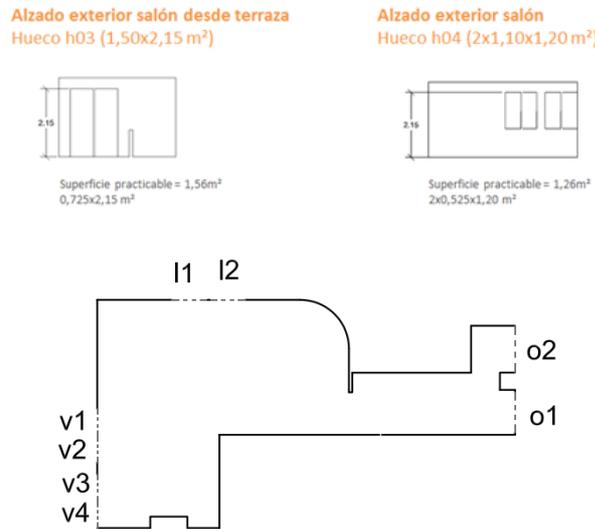


Figura 58. Disposición de huecos en fachada de Zona 1

- v1,v2,v3,v4 (medias ventanas abiertas)
  - 11,12 (medias puertas correderas)
  - o1,o2 (rejillas de salida del aire)
- Dormitorios

En el caso de la zona de dormitorios, las aperturas posibles en cuanto a puertas existentes se muestran a continuación. Es necesario comentar que los huecos que se encuentran a la izquierda de cada caso quedarían en la zona 3, es decir, fuera de estudio. Además, posteriormente se contemplará la posible apertura de una ventana en el Dormitorio 1.



Figura 59. Disposición configuraciones posibles en la fachada de Zona 2

Se debe comentar que tanto la fachada Este de la Zona 2, como la fachada Sur de la Zona 1, dan a una terraza, la cual se encuentra resguardada, dando la impresión de zona interior, sin embargo, esta se encuentra expuesta a la intemperie.

### 3.3.3.2 Modelado CFD

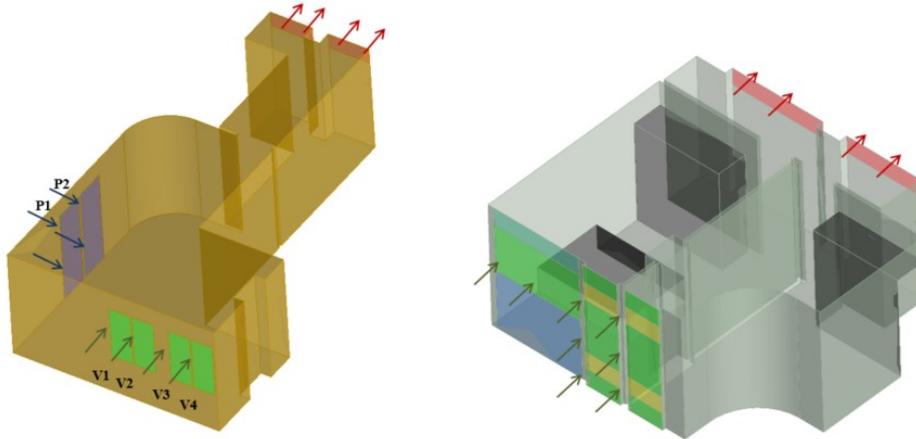
El modelado en CFD consta de una precisión suficiente para caracterizar los modelos que no requieran el cálculo de parámetros afectados por fenómenos microscópicos en la zona cercana a la pared.

Los datos que son necesarios introducir en el modelo han quedado reflejados previamente en la presentación del caso estudiado. A diferencia de los dos casos previos, se produce una variación en el objetivo ya que ahora

no se pretende obtener el valor de los coeficientes de película, sino la caracterización y estudio de la configuración de huecos que permita una mejor ventilación. Todo esto implica un alto número de casos de ejecución, y un nivel precisión requerido de solución semi-cuantitativa, ya que solo se requiere determinar cuál es mejor o peor y en qué porcentaje.

La geometría de la “Zona 1” viene determinada como se muestra a continuación, modelando todos los posibles huecos de entrada (Verdes y Azules) y todas las salidas (Rojo). A su vez, se encuentra impuesta la nomenclatura de dichos huecos para su posterior referencia.

De manera análoga, se realiza el mismo proceso para la “Zona 2”, en el que se muestran los posibles huecos de entrada en Verde/Amarillo (No existe distinción, solo para diferenciar las discretizaciones realizadas) y los huecos de salida (Rojo).



**Figura 60. Huecos de entrada y salida en fachada**

A su vez, se observa la implementación en esta última zona de una cama de Matrimonio y un Armario en el Dormitorio 1, así como un armario en el Dormitorio 3. Esto hará que el flujo predicho resulte en cierta medida, más realista.

El modelo turbulento aplicado para el Protocolo de “baja precisión”, será k-e Realizable y/o k-e RNG. En este caso, debido a su mejor ajuste durante el desarrollo del protocolo, se selecciona el modelo k-e Realizable.

No obstante, como se ha podido comprobar en las aplicaciones previas, la solución arrojada por ambos modelos resulta en cierta medida parecida.

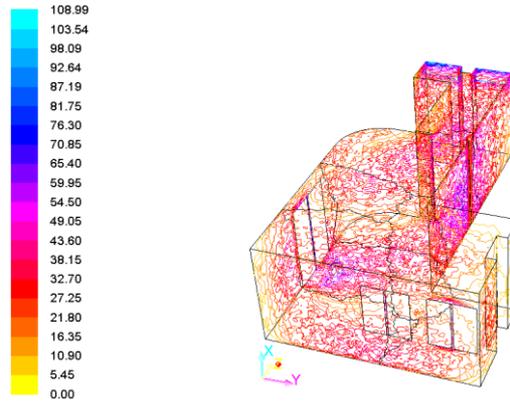
El punto clave que determina la “Baja precisión”, resulta ser la selección de un tratamiento en pared aproximado, por medio de las “Wall-Function” o funciones de pared. Esto conlleva una menor demanda computacional por dos razones:

- Evita el cálculo referente a la resolución de la capa límite, ya que la aproxima.
- Requiere una malla con un  $y^+ = 30-300$ , con lo que esta será unos ordenes de magnitud más liviana que la del “Protocolo de alta precisión”.

El mallado será, por tanto, un proceso iterativo, similar al realizado en otras aplicaciones para la Malla pre-inicial. Sin embargo, a la vez se estudiará también el  $y^+$  obtenido, refinando o agrandando los tetraedros en superficie para alcanzar el valor deseado de dicha variable. Una vez obtenida la malla para la Zona 1, se generará la correspondiente a la Zona 2 bajo las mismas características.

Se genera una malla con elementos uniformes en todo el recinto con un tamaño igual al que convergían las mallas de casos previos en el núcleo.

Se debe tener en cuenta que todas las medidas de “y (m)” están escaladas por el factor “Global size element = 0.4”.



**Figura 61. Esquema de isovalores de  $y^+$ , según la malla implementada**

Se observa que existen ciertas partes en el intervalo de  $y^+$  5-20. No obstante estas se sitúan en las esquinas generalmente y se presentan en baja proporción, por lo que se puede considerar que en general el valor estará por encima de  $y^+$  20.

<b>1 iter.</b>	<b><math>\Delta y</math></b>	<b><math>y^+</math></b>	<b><math>y^+</math> restringido</b>	<b><math>\Delta y</math> modificado</b>
Sup. 1	0.2	20-80	5-20 y >300	Conv.

**Tabla 12. Valores obtenidos en la primera iteración que demuestran la convergencia en malla**

Aunque podría seguir afinándose la malla, no tendría mucho sentido ya que se conoce su suficiencia de tamaño en el núcleo en casos similares, y en pared se cumple la condición necesaria de  $y^+$ .

### 3.3.4 Resultados

A diferencia de los casos previos, en este solo se produce una resolución hidrodinámica ya que solamente se está interesado en el conocimiento y determinación de la ventilación del recinto.

Así pues, se plantean un número total de casos igual a 11.

	<b>caso</b>	<b>Zona 2</b>	<b>caso</b>	<b>Zona 1</b>
<b>Casos base.</b>	1	Caso 1	8	v1+v3+p1
	2	Caso 2	9	v1+v3+p2
	3	Caso 3	10	v2+v4+p1
	4	Caso 4	11	v2+v4+p2
	5	Caso 5		
	6	Caso 6		
<b>Casos extra.</b>	7	Caso Optima + ventana		

**Tabla 13. Configuraciones a estudiar**

Se muestran a continuación, los resultados obtenidos para ambas zonas.

### 3.3.4.1 Zona 1

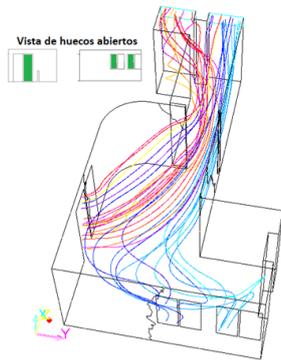


Figura 62. Líneas de flujo generadas para la configuración de huecos en el caso 8



Figura 64. Líneas de flujo generadas para la configuración de huecos en el caso 10

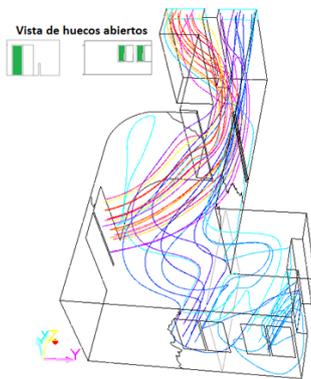


Figura 63. Líneas de flujo generadas para la configuración de huecos en el caso 9



Figura 65. Líneas de flujo generadas para la configuración de huecos en el caso 11

	Entradas		Salidas
Caso	ventanas	puertas	rejillas
A	v1,v3	-	o1,o2
B	v1,v3	l1	o1,o2
C	v1,v3	l2	o1,o2
D	v2,v4	-	o1,o2
E	v2,v4	l1	o1,o2
F	v2,v4	l2	o1,o2

Tabla 14. Casos Zona 1

Salón	kg/s	Ren/h
caso 1	0.934	46.11

caso 2	0.945	46.65
caso 3	0.937	46.26
caso 4	0.933	46.06
Vol:	59.528 m <sup>3</sup>	

Tabla 15. Cantidad de aire evacuado/introducido en el recinto

Se observa como para cada uno de los casos planteados, el caudal ventilado resulta equivalente. Este comportamiento se debe a la suposición de que el viento como componente vectorial, incide de la misma forma en los huecos de las diferentes orientaciones. Se analiza ahora cada uno de los casos por separado.

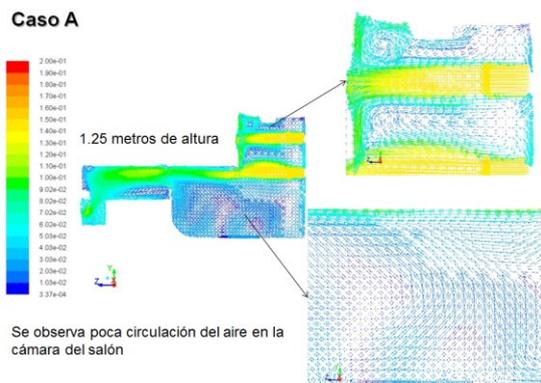


Figura 66. Caso A

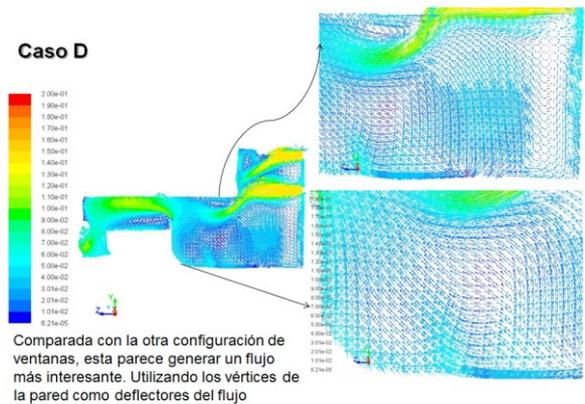


Figura 69. Caso D

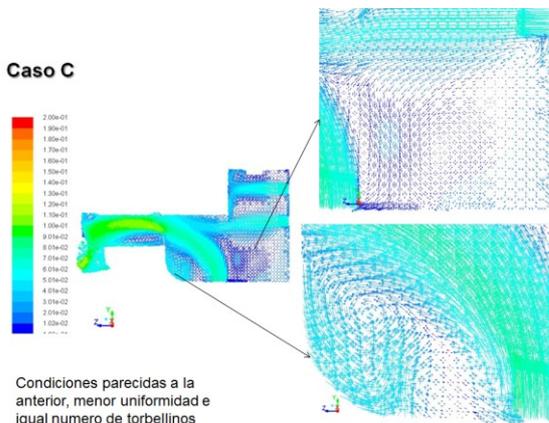


Figura 67. Caso C

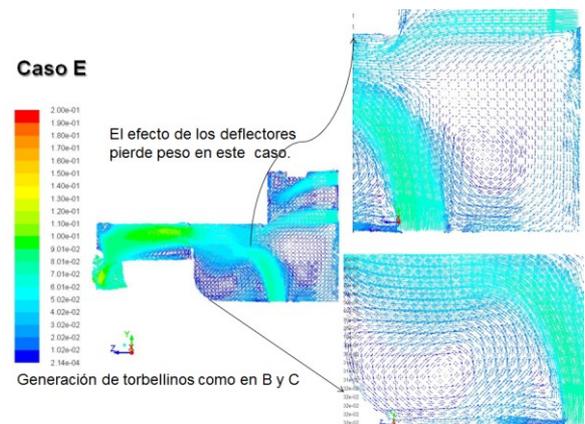


Figura 70. Caso E

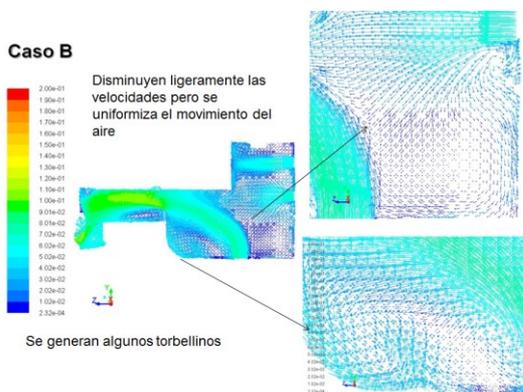


Figura 68. Caso B

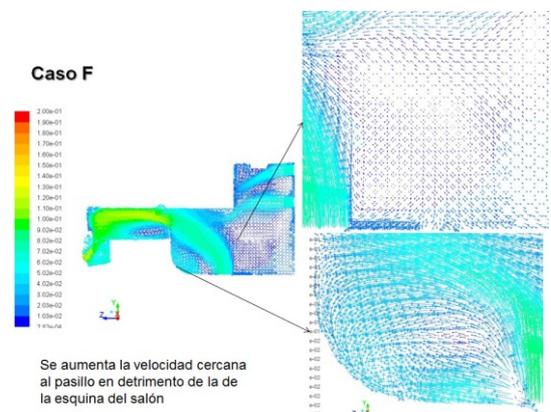


Figura 71. Caso F

En base a una buena ventilación de la vivienda, en principio quedarían descartados los casos en los que solo están las ventanas abiertas, ya que se aprecia un menor volumen efectivo de barrido.

En los cuatro casos restantes las características son semejantes y ninguno es el claro vencedor. Sin embargo, con vistas a un futuro puesto en la tecnología del night-cooling (enfriamiento de los muros), se seleccionarán las configuraciones en las que las velocidades en las zonas cercanas a los muros interiores sean mayores en media.

Nuestros casos son por lo tanto el B y el F.

Para saber si existe una sustancial diferencia entre ambas configuraciones es necesario un estudio más profundo, pero a priori, se cree que tendrán comportamientos similares.

### 3.3.4.2 Zona 2



Figura 72. Líneas de flujo generadas para la configuración de huecos en el caso 1

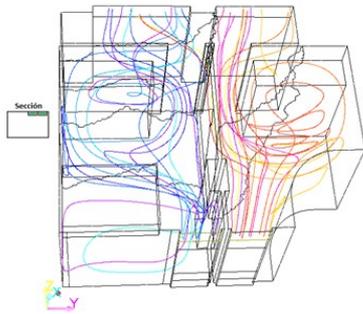


Figura 73. Líneas de flujo generadas para la configuración de huecos en el caso 2



Figura 74. Líneas de flujo generadas para la configuración

En este caso, como se esperaba, ocurre algo similar ya que las renovaciones del aire encerrado, crecerán a medida que también crezca la sección de los huecos de entrada.

de huecos en el caso 3



Figura 75. Líneas de flujo generadas para la configuración de huecos en el caso 5

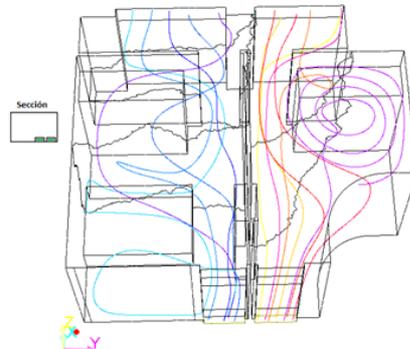


Figura 76. Líneas de flujo generadas para la configuración de huecos en el caso 4



Figura 77. Líneas de flujo generadas para la configuración de huecos en el caso 6

Dormitorio	kg/s	Ren/h
caso 1	1.578	87.201
caso 2	0.747	41.279
caso 3	1.167	64.562
caso 4	0.759	41.943
caso 5	1.179	65.152
caso 6	1.177	65.042
Vol:	53.18 m <sup>3</sup>	

Tabla 16. Cantidad de aire evacuado/introducido en el recinto

Además, se presenta a continuación un caso extra en el que se supone la inclusión de una ventana en el Dormitorio 1. El objeto de dicha modificación será el de tratar de aumentar de manera notable el nivel de ventilación.

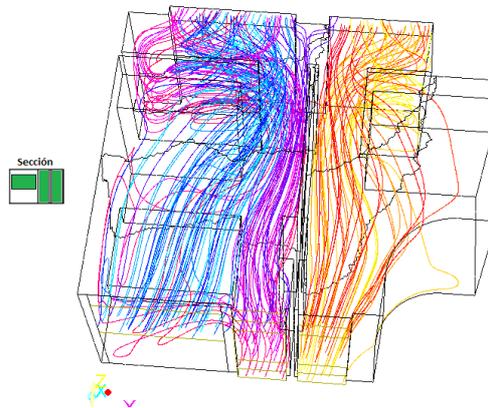


Figura 78. Líneas de flujo generadas para la configuración de huecos en el caso extra

Dormitorio	kg/s	Ren/h
Caso extra	1.647 kg/s	91.025 Ren/h

Tabla 17. Cantidad de aire evacuado/introducido en el recinto

### 3.3.5 Conclusiones

Ya que se han realizado los estudios de las diferentes configuraciones de huecos posibles por separado, también las decisiones se tomarán acordes a esta fragmentación.

En primer lugar, dada la característica vectorial del viento de componente Sur-Este, este incide de igual manera en los huecos Sur y Este de la fachada. Esto provoca que tanto más aumente la superficie de huecos de entrada, mayor serán los niveles de ventilación hasta un cierto punto.

Es por tanto que en la **Zona 1**, todos los casos estudiados implican el mismo nivel de ventilación. Además, los casos 8 y 11 realizan un mejor barrido sin producir recirculaciones.

Sin embargo, estas no llegan a ser razones de peso para la toma de decisiones, por lo que se propone la consideración de la técnica Night-Cooling, y procurando para ello que la configuración elegida proyecte los chorros de aire contra las zonas de mayor densidad másica. Además, podría estudiarse la posibilidad de sustituir las ventanas por unas de hojas abatibles, de tal forma que el tamaño de hueco aumente y por tanto también la ventilación de la habitación.

En cuanto a la **Zona 2**, se aprecia que conforme el hueco de entrada es mayor, también es más alto el nivel de ventilación. Es por ello que de los casos inicialmente planteados, el “caso 1”, con las dos puertas abiertas resulta el más interesante, debido a que es el que mayor nivel de ventilación tiene, además de ser la configuración existente en la vivienda.

Se puede observar a su vez, que tras la consideración de dicho caso, más la inclusión de una ventana, el nivel de ventilación por la acción del viento ya está saturando el recinto por lo que la adición de dicho elemento no supone un crecimiento notable en las renovaciones del aire interior. Así, se desestima la implementación de este hueco.

## 3.4 APLICACIÓN 4: EVALUACIÓN DE AHORROS

### 3.4.1 Descripción

La inercia térmica es un concepto clave en las técnicas bioclimáticas ya que la capacidad de acumulación térmica de las soluciones que conforman un elemento arquitectónico es básica para conseguir el adecuado nivel de confort.

Esta medida de mejora conlleva dos fenómenos, uno de ellos es el de la amortiguación en la variación de las temperaturas, es decir, existe mas variación de temperaturas exterior interior en nuestro edificio que en uno construido con cerramientos tradicionales.

El segundo fenómeno es el retardo de la temperatura interior respecto a la exterior, es decir, el calor ganado durante las horas de incidencia solar se cede al espacio interior varas horas después. Con estas soluciones de hormigón armado en las paredes podemos aprovechar el calor ganado durante las horas de sol; en periodos de invierno podemos aprovechar esto para calentar el edificio durante las horas de noche de forma gratuita.

Para implementar esta filosofía en el presente edificio, se modifican las soluciones constructivas par los cerramientos sustituyendo los cerramientos tradicionales por cerramientos de hormigón armado en paneles prefabricados, obteniendo los beneficios antes reflejados por las propiedades intrínsecas de este material.

A medida que el flujo de aire exterior aumenta durante la noche, cae la temperatura interior y al mismo tiempo las velocidades típicas de paso aumentan lo que se refleja en un mayor enfriamiento del muro. Si esto se da sobre elementos con poca inercia, rápidamente se alcanza el equilibrio y cesa la transferencia pero si se acentúa en puntos con elevada inercia térmica, estos elementos contribuyen a almacenar energía y amortiguar los efectos térmicos exteriores y así reducir la demanda energética.

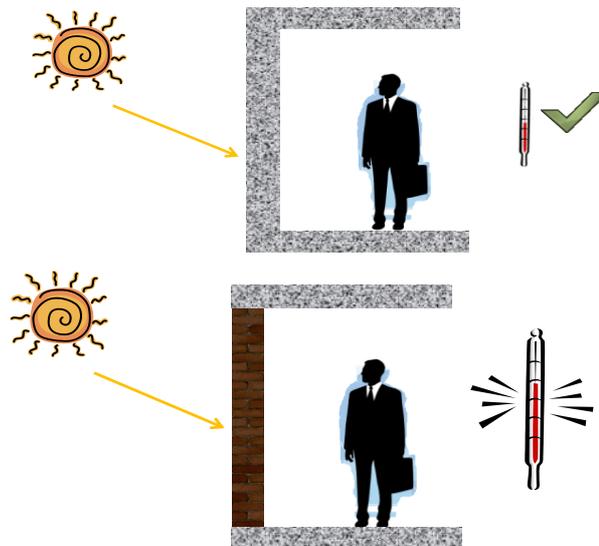


Figura 79. Incremento de la inercia en la envuelta del edificio mediante cerramientos de hormigón

La irregularidad temporal de la demanda de energía está fuertemente influenciada por las condiciones meteorológicas externas pero puede ser compensada en parte, no solo a través del uso de elementos constructivos con fuerte inercia térmica sino también con el uso de soluciones técnicas que, en la estación estival, favorezca la evacuación de calor de estos elementos y en épocas invernales apuesten por el calentamiento de los mismos.

Las variaciones térmicas exteriores son, en ocasiones, fuertemente variables, pudiéndose encontrar variaciones de 14°C en Sevilla, 12°C en Madrid o 11°C en Barcelona. Por ello, el uso de elementos másicos con gran capacidad de absorber calor resulta un buen sistema para amortiguar estas variaciones (como los muros de hormigón del edificio) si se combina con una estrategia de refrigeración apropiada. Por ello surge el concepto de Night cooling en el que se intenta favorecer el enfriamiento de los elementos con mayor inercia, elementos que requieren un periodo de tiempo relativamente largo para enfriarse (la noche) para que de este modo su temperatura durante las horas de sol sea lo más baja posible.

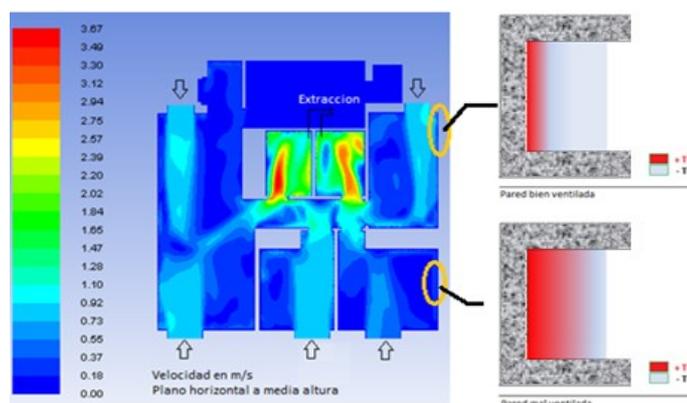
Para implementar esta filosofía en el presente edificio, se sustituye la ventilación natural por ventilación forzada por medios mecánicos (extractores en los baños) durante las horas nocturnas para así refrigerar lo antes posible los cerramientos con masa térmica capaces de acumular el frío hasta el día siguiente.

		Potencia	Caudal Máximo		Peso	Dimensiones máximas	Precio aproximado
Marca	Modelo	kW	m <sup>3</sup> /h	db	kg	mm	
CASALS	BD 25/25 M6 1/5 3V	0.15	2600	57	18	407 X 376 X 350	260 €

**Tabla 18. Ejemplo Ventilador para 25 ren/h en salón y 4 ren/h en dormitorios**

A medida que el flujo de aire exterior aumenta durante la noche, cae la temperatura interior y al mismo tiempo las velocidades típicas de paso aumentan lo que se refleja en un mayor enfriamiento del muro. Si esto se da sobre elementos con poca inercia (cerramientos tradicionales), rápidamente cesa la transferencia pero si se acentúa en puntos con elevada inercia térmica como son los cerramientos de hormigón ejecutados, estos elementos contribuyen a almacenar energía y amortiguar los efectos térmicos exteriores, reduciendo la demanda energética y mejorando el confort interior de las viviendas.

En la siguiente figura se muestra la simulación por ordenador, donde se observa esta estrategia de ventilación, el movimiento de aire y sus velocidades, cuidando siempre los umbrales de desconfort para las zonas ocupadas.



**Figura 80. Simulación ventilación**

En la simulación por ordenador se observa esta estrategia de ventilación, el movimiento de aire y sus velocidades, cuidando siempre los umbrales de desconfort para las zonas ocupadas.

### 3.4.2 Cálculo de h mediante CFD

El estudio de la ventilación nocturna tiene especial interés cuando se introducen elementos masivos de alta inercia térmica ya que un uso eficiente de la misma, cuando esta se activa adecuadamente a través de la ventilación nocturna, puede incurrir en un importante ahorro energético en el edificio.

La idea que persigue la ventilación nocturna es acentuar la refrigeración de estos elementos masivos durante las horas en que las temperaturas exteriores son menores durante la noche. De este modo, dado que la inercia de estos elementos hormigonados es relativamente elevada, toda la capacidad frigorífica que haya sido almacenada durante estas horas, será de utilidad durante las horas centrales del día puesto que igualmente muestra una cierta lentitud a la hora de calentarse.

El hecho de poner el énfasis en el coeficiente de película nocturno se ve respaldado en la medida en que una mayor rapidez en la extracción de energía durante la etapa de refrigeración, incurrirá en una menor temperatura “punta” en las horas centrales del día donde la demanda de refrigeración podría ser máxima a igualdad de parámetros medioambientales.

Por ello, para el cálculo de los coeficientes de película ocasionados por el incremento de la ventilación, se elabora un modelo numérico mediante la herramienta informática FLUENT donde, a través de elementos

finitos, se resuelve el movimiento del aire en el recinto así como la capa límite que se desarrolla sobre las paredes.

Para ello, con objeto de incrementar al máximo el valor de este coeficiente, se incrementan al máximo las renovaciones hora del sistema sin obtener valores de velocidades excesivos que puedan ocasionar discomfort.

Con estos valores, posteriormente se resuelve un problema cuasi-estacionario en el que, suponiendo que el aire transfiere de forma estacionaria se observa la evolución de la temperatura de la sala en el caso de usar hormigón y de usar un cerramiento tradicional.

Para ello se sigue el siguiente esquema:

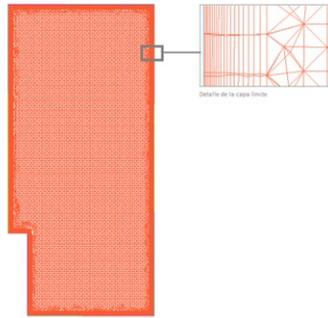


Figura 81. Mallado del recinto a estudiar, salón

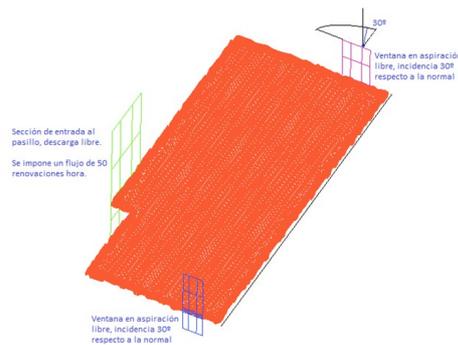


Figura 82. Se imponen las condiciones de contorno

Resuelto el problema fluido mecánico se obtienen los siguientes resultados sobre los coeficientes de película:

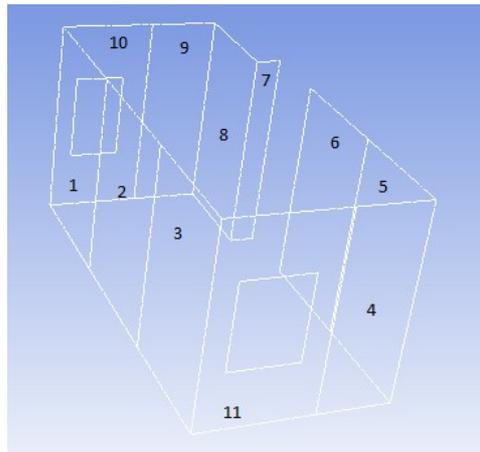
$T_{pared}$ (K)	$T_{interior}$ (K)	Q emitido (W)	Area de transferencia (m <sup>2</sup> )	H (W/m <sup>2</sup> K)	Zona
300	293.2	260.7	8.194	4.6	Pared1
300	293.2	75.7	4.450	2.5	Pared10
300	293.2	83.4	5.204	2.3	Pared11
300	293.2	219.6	8.438	3.8	Pared2
300	293.2	262.6	7.867	4.9	Pared3
300	293.2	60.5	4.455	1.9	Pared4
300	293.2	82.5	6.984	1.7	Pared5
300	293.2	142.3	6.840	3.0	Pared6
300	293.2	45.6	1.505	4.4	Pared7

300	293.2	109.1	6.510	2.4	Pared8
300	293.2	72.5	4.199	2.5	Pared9
300	293.2	329.1	22.111	2.2	suelo
300	293.2	329.9	22.111	2.2	techo

**Tabla 19. Valores de h media en cada una de las paredes**

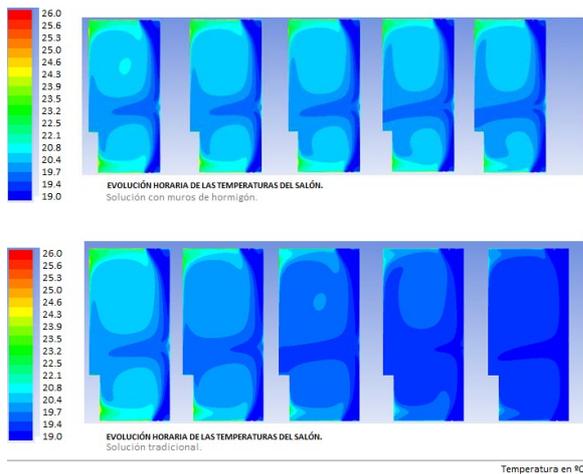
De este modo, se identifican las paredes con mayor coeficiente de película donde debe colocarse la inercia.

A continuación se muestra la discretización realizada:

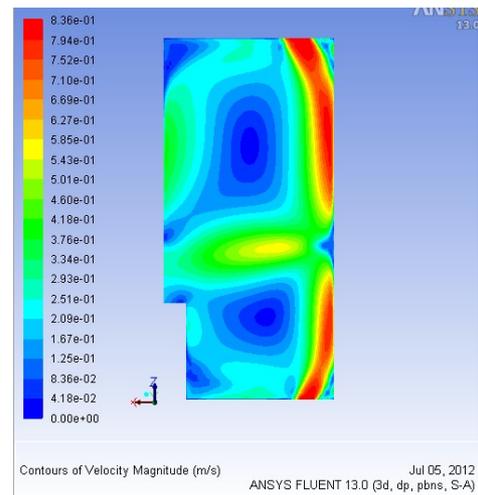


**Figura 83. Discretización realizada**

A continuación se muestra la evolución térmica del recinto durante las horas nocturnas y se comprueba que en ningún momento se superan velocidades de 1 m/s en ningún punto del salón.



**Figura 84. Evolución térmica del recinto horas nocturna**



**Figura 85. Velocidad del aire en el salón.**

Este dato asegura la viabilidad técnica de la solución al cumplir las condiciones termohigrométricas típicas de espacios acondicionados. [17]

### 3.4.3 HULC

#### 3.4.3.1 Descripción del caso

La geometría de la vivienda unifamiliar en bloque queda de la siguiente forma

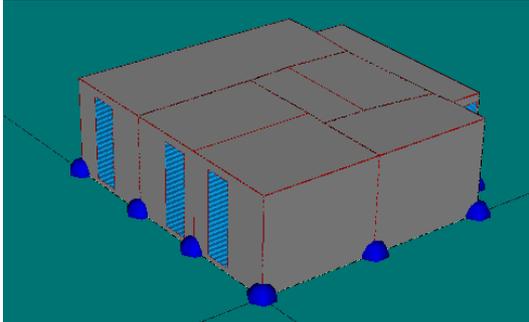


Figura 86. Geometría vivienda unifamiliar

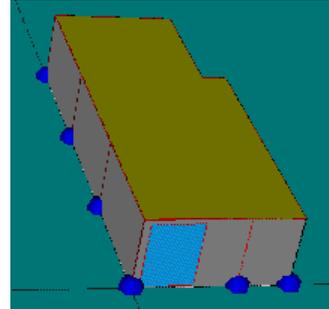


Figura 87. Geometría vivienda unifamiliar (2)

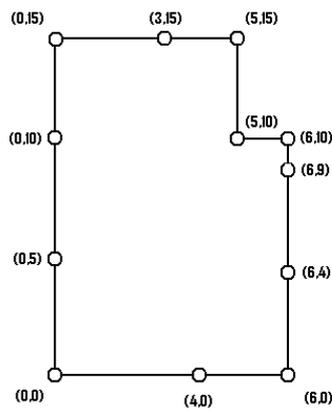


Figura 88. Dimensiones vivienda unifamiliar

Sin embargo, el estudio CFD se ha centrado en el salón, por lo que se realiza también un modelo del salón para analizar el problema de forma más precisa.

A continuación, se muestra una tabla con los distintos tipos de material y medidas de espesor que se pueden utilizar en la definición de un cerramiento.

Tipo de material	Mortero de cemento o cal para albañilería	Hormigonaco	Expandido con dióxido de carbono CO <sub>2</sub>	Mortero de yeso	
Espesor (m)	0.02	0.10	0.08	0.10	0.015

Tabla 20. Tipología cerramiento

Se han añadido dos ventanas de vidrio doble vertical, de dimensiones a continuación mostradas:

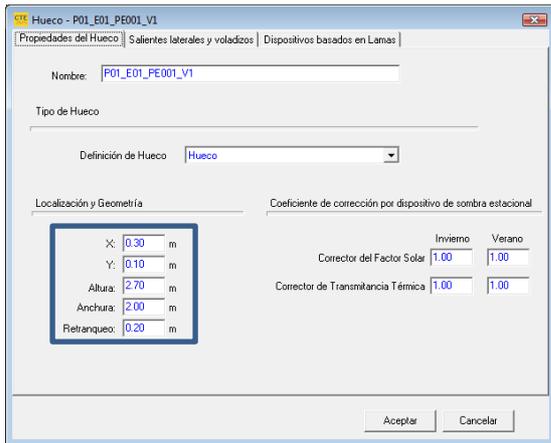


Figura 89. Dimensiones ventana 1

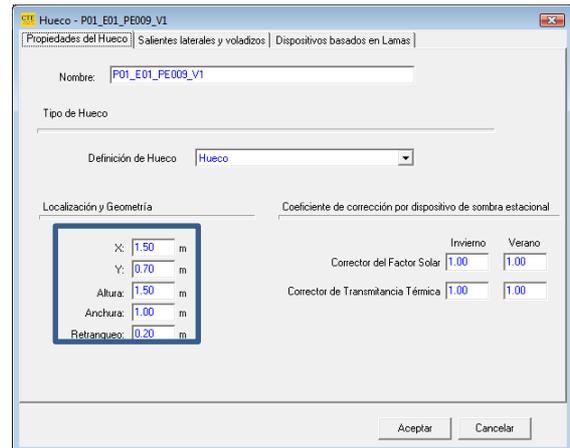


Figura 90. Dimensiones ventana 2

### 3.4.3.2 Parámetros característicos

En primer lugar, resulta necesario plasmar el inicio del problema de la caracterización mensual/estacional de la demanda energética del edificio. Suponiendo que durante un cierto periodo se desea mantener una temperatura interior constante, el balance global de energía sobre el edificio puede expresarse como:

$$Q = {}^{\circ}Q_T + {}^{\circ}Q_V + {}^{\circ}Q_S + {}^{\circ}Q_{FI}$$

Dónde:

$Q$ : Demanda energética del edificio

$Q_T$ : Transferencia de calor a través de los cerramientos opacos, vidriados y sus uniones como consecuencia de la diferencia de temperatura entre el exterior y el interior.

$Q_V$ : Intercambio de energía originada por la entrada voluntaria (ventilación) o involuntaria (infiltración) de aire del exterior.

$Q_S$ : Transferencia hacia el aire debida a la radiación solar.

$Q_{FI}$ : Transferencia hacia el aire debida a las fuentes internas, es decir, ocupantes, iluminación y equipo diverso.

El balance anterior es válido para cualquier régimen sin más que asignar en cada momento el signo apropiado a los diferentes flujos de calor. Por consiguiente, se puede hacer una primera distinción entre la energía que “se fuga” del edificio (pérdidas) y la energía que “entra” (ganancias), resultando:

$$Q_{CAL} = {}^{\circ}Q_{pérdidas} - {}^{\circ}Q_{gananciasnetas}$$

$$Q_{REF} = {}^{\circ}Q_{ganancias} - {}^{\circ}Q_{pérdidasnetas}$$

La demanda de energía de un edificio no es más que el flujo de energía ideal que se requiere aportar en calefacción o extraer en refrigeración para mantener el espacio en unas ciertas consignas de confort. Dicho esto, se puede entender que en el caso de calefacción las ganancias de energía sea un efecto útil, que maximizado puede hacer que no se requiera ni la operación de un equipo de climatización; y en su caso en refrigeración, el efecto de que existan fugas de energía en forma de pérdidas es positivo. Con esto, la demanda energética de un edificio, no es más que la diferencia entre las pérdidas de energía que tiene y las ganancias netas o útiles que recibe para calefacción; y la diferencias entre las ganancias recibidas y las pérdidas netas o útiles que tiene. Es importante señalar que los efectos dinámicos aparecen recogidos en esta formulación al hablar de “flujos netos” como se puede ver en el epígrafe correspondiente; y que por convención este dinamismo se recoge en la energía útil para reducir la demanda.

Por tanto, a lo largo de las siguientes líneas se detalla el concepto de pérdidas (transmisión, infiltración y ventilación), ganancias (radiación y fuentes internas), y sus correspondientes valores netos o útiles.

$$Q_{PÉRDIDAS} = Q_V + Q_T \cong \int_t [\rho C_p \cdot n \cdot V + UA] \cdot \theta_i(t) - \theta_e(t) \cdot dt$$

De cara al modelo desarrollado, la ventilación e infiltración aparecen agrupadas en forma de unas renovaciones hora equivalentes. Quedando la formulación de la siguiente forma

$$Q_V \cong \int_t \rho C_P \cdot n \cdot V \cdot \theta_i(t) - \theta_e(t) \cdot dt = \rho C_P \cdot n_{eq} \cdot V \cdot \int_t \theta_i(t) - \theta_e(t) \cdot dt$$

Concluyendo, una primera aproximación de los intercambios por transmisión a través de la epidermis del edificio puede ser:

$$Q_{T-c} \cong \int_t UA \cdot \theta_i(t) - \theta_e(t) \cdot dt = UA \cdot \int_t \theta_i(t) - \theta_e(t) \cdot dt$$

Para modelar las ganancias solares se hace uso del área solar sur equivalente  $ASSE$ , y de la radiación integrada sur incidente efectiva  $I_{s-e}$ . Resultando:

$$Q_S = ASSE \cdot I_{s-e}$$

Dónde el Área solar sur equivalente  $ASSE$  es la relación entre la radiación que reciben las ventanas en sus correspondientes orientaciones y con las sombras propias y/o lejanas que tengan, y la radiación que recibirían si estuvieran orientadas al sur sin ningún tipo de sombra.

En los siguientes puntos se calculan los parámetros energéticos del edificio. Estos parámetros son útiles para la elaboración de un modelo simplificado mensual o para la realización de una diagnosis del caso.

### 3.4.3.3 Transmisión, ventilación e infiltraciones

Los parámetros energéticos referidos a las pérdidas del edificio son:

- $UA$  [W/K] = 68 teniendo en cuenta el efecto de los puentes térmicos, que toma un valor de 29.5 [W/K].
- $\rho C_P \cdot n_{eq} \cdot V$  [W/K] = 4.7

Para obtenerlos se han realizado pasadas sucesivas en las que se ha mantenido una temperatura unidad constante en el interior del espacio con unas excitaciones convectivo-radiantes exteriores nulas. En cada pasada se ha anulado alguno de los efectos:

- Pasada 0: se mantiene un grado de temperatura interior. El flujo de calor en régimen permanente es el debido a las pérdidas por transmisión, ventilación e infiltraciones [ $\rho C_P \cdot n \cdot V + UA$ ]
- Pasada 1: se anula el efecto de la ventilación e infiltraciones. El calor suministrado para mantener 1°C en el interior del espacio se debe al efecto de la transmisión en el edificio [ $UA$ ]
- Pasada 2: se anulan los puentes térmicos. De esta forma sobre la pasada 1 se estima la contribución de los puentes térmicos a las pérdidas. [ $UA$  sin puentes térmicos]
- Pasada 3: Sobre el caso 2 se activa el efecto de infiltraciones y ventilación. Así se puede comparar 0 y 3 para obtener  $\rho C_P \cdot n_{eq} \cdot V$

### 3.4.3.4 Ganancias

Para el cálculo del efecto de las ganancias se van a realizar pasadas en evolución libre. Las pasadas a realizar son 3.

- Pasada 4: evolución libre del caso nominal
- Pasada 5: se anula el efecto de la radiación, para ello del archivo climático se hace nula la excitación directa y difusa
- Pasada 6: sobre la pasada 5 se anula el efecto de las fuentes internas.

De esta manera se puede obtener el incremento de temperaturas que supone cada uno de los efectos en valor promedio mensual. Este incremento de temperaturas se relacionará directamente con el flujo de calor ganado.

Las etapas realizadas son:

- Cálculo de temperatura media interior para los meses de junio, julio, agosto y septiembre
- Cálculo de la radiación global integrada en esos meses
- Cálculo de la temperatura media exterior

$\rho C_p \cdot n \cdot V + UA$ [W/K]	68			
°C	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE
T1=Temp. Interior Nominal (Pasada 4)	29.66	33.83	34.86	32.68
T2=Temp. Interior NO Rad (Pasada 5)	25.71	29.55	30.81	29.33
TEXT: Temp. Exterior	23.44	26.85	26.79	24.41
RAD=Radiación [Wh]	215773	234556	213658	159787
T1-TEXT	6.22	6.98	8.07	8.27
T2-TEXT	2.27	2.70	4.03	4.92
Incr. Temp. Debido a Rad	3.95	4.28	4.05	3.34
ASSE (m2/m2)	0.0012	0.0012	0.0013	0.0014

Tabla 21. Temperatura media interior, radiación global y temperatura media exterior

### 3.4.4 Ventilación nocturna

Ya antes se ha dicho que el ventilador proporciona 2600 m<sup>3</sup>/h, por lo que considerando el volumen del salón se tienen 10.2 Ren/h de aire en el espacio.

$$\text{Cálculo: Volumen} = 6 * 10 + 5 * 5 = 85 \text{ m}^2 * 3\text{m} = 255\text{m}^3 \rightarrow \frac{2600}{255} = 10.2 \text{ ren/h}$$

En primer lugar se realizan pasadas con la herramienta variando el nivel de ventilación nocturna. El objetivo es conocer cuál es el ahorro estimado por la herramienta sin el uso de la capacidad adicional.

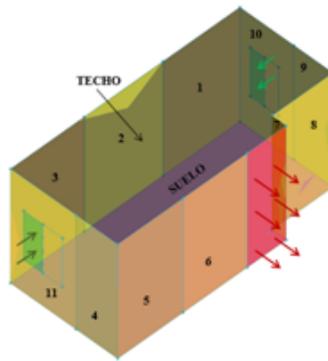
	Demanda Refrigeración kWh/m2	Ahorro [%]
Sin Ven. Nocturna	20.87	-
2 ACH	17.14	17.84
4 ACH	14.06	32.60
6 ACH	12.34	40.87
8 ACH	11.35	45.58
10 ACH	10.75	48.48
12 ACH	10.36	50.35
10.2 ACH	10.70	48.70

Tabla 22. Demanda refrigeración y ahorro

Estos resultados están calculados considerando un coeficiente de transferencia convectivo de 2 W/m<sup>2</sup>K para las paredes verticales y 4.3 W/m<sup>2</sup>K para las horizontales. Ahora bien, gracias al trabajo realizado, estos coeficientes de transferencia pueden modificarse para los elementos de inercia.

h (W/m <sup>2</sup> K)	Zona
4.6	Pared1
3.8	Pared2
4.9	Pared3

**Tabla 23. Coeficientes de transferencia por zona**



**Figura 91. Efidicio por zonas**

Si se hace uso de la capacidad adicional y se establecen estos coeficientes de transferencia convectiva para esas regiones durante las 8h del enfriamiento nocturno, resulta:

Los resultados muestran el interés de utilizar herramientas de simulación energética en las que el usuario tiene la capacidad de cambiar parámetros por defecto. Y a su vez, la necesidad de las mismas para la valoración de elementos/situaciones de mejora.

# 4 CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

---

En este trabajo se han conseguido desarrollar las siguientes líneas:

- En primer lugar, se tiene el cálculo de coeficientes de presiones en la envuelta de un faro, a través del modelado de este mismo en el interior de un túnel de viento.
- A continuación, se encuentra la capacidad del cálculo de coeficientes de transferencia convectiva en el interior de conductos a partir de simulaciones en ANSYS CFD FLUENT.
- Siguiendo, se muestra qué metodología es válida para la caracterización de patrones de flujo, los cuales nos permiten conocer cómo se mueve el aire en el interior de locales.
- Para terminar, se presenta el interés de utilizar herramientas de simulación energética en las que permita la modificación de parámetros por defecto. Todo esto para conseguir una mejora energética.

Como línea futura a estudiar, se propone la aplicación de los casos anteriormente nombrados a un edificio real monitorizado al que se le pueda aplicar todo el procedimiento.

Además se propone como un estudio complementario el uso de una herramienta de simulación energética de edificios basada en el método directo, ya que el indirecto por definición comete errores no despreciables cuando el coeficiente de transferencia convectiva es variable.



# 5 ANEXO I

Correlaciones convección forzada con flujo interno en conducto circular:

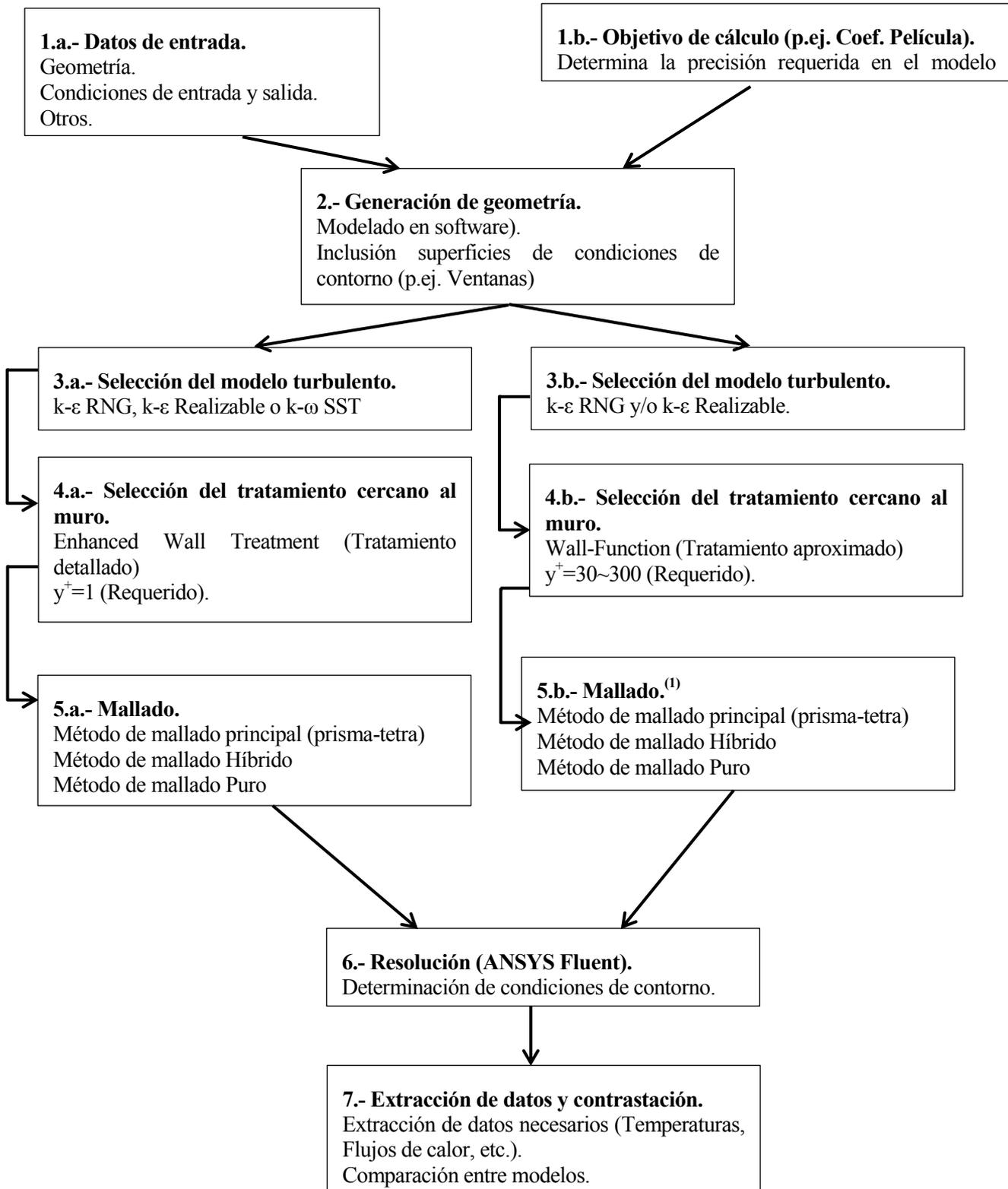
Nº	Correlación	Condiciones de aplicación
18	$x_{entt} \approx 0.0575 D Re_D Pr$	Laminar, Región de entrada térmica
19	$f = 64/Re_D$	Laminar, complet. desarrollado
20	$f = 0.316 Re_D^{-1/4}$	Turbulento, complet. desarrollado, sup. no rugosa, $Re_D \leq 2 \cdot 10^4$
21	$f = 0.184 Re_D^{-1/5}$	Turbulento, complet. desarrollado, sup. no rugosa, $Re_D > 2 \cdot 10^4$
22	$f = 0.790 \ln \left( \frac{Re_D}{3000} \right)^{-1} \left( \frac{\mu}{\mu_s} \right)^{-1}$	Turbulento, complet. desarrollado, sup. no rugosa, $3000 \leq Re_D \leq 5 \cdot 10^6$
23	$Nu_D = 3.66$	Laminar, completamente desarrollado, $T_s$ cte, $Pr \geq 0.6$
24	$Nu_D = 4.36$	Laminar, completamente desarrollado, $q_s$ cte, $Pr \geq 0.6$
25	$\overline{Nu}_D = 3.66 + \frac{0.0668 (L/D) Re_D Pr^{1/3}}{1 + 0.04 (L/D) Re_D Pr^{2/3}}$	Laminar, entrada térmica con perfil de velocidad completamente desarrollado, $T_s$ cte, $Pr \gg 1$ o zona inicial sin transferencia de calor
26	$\overline{Nu}_D = 1.86 \left( \frac{Re_D Pr}{L/D} \right)^{1/3} \left( \frac{\mu}{\mu_s} \right)^{0.14}$	Laminar, ent. térmica e hidrodinámica, $T_s$ cte, $0.48 \leq Pr < 16700$ , $\left( \frac{Re_D Pr}{L/D} \right)^{1/3} \left( \frac{\mu}{\mu_s} \right)^{0.14} \geq 2$ , $0.0044 < \mu / \mu_s < 3.75$
27	$Nu_D = 0.023 Re_D^{4/5} Pr^n$	Turbulento, complet. desarrollado, $Re_D > 10000$ , $0.6 \leq Pr < 160$ , $(L/D) > 10$ , $n = 0.4$ para $T_s > T_m$ , $n = 0.3$ para $T_s < T_m$
28	$Nu_D = 0.027 Re_D^{4/5} Pr^{1/3} \left( \frac{\mu}{\mu_s} \right)^{0.14}$	Turbulento, completamente desarrollado, $Re_D > 10000$ , $0.7 \leq Pr < 16700$ , $(L/D) > 10$
29	$Nu_D = \frac{(f/8) Re_D Pr}{1 + 2.7 (f/8)^{1/2} Pr^{2/3}}$	Turbulento, completamente desarrollado, $3000 < Re_D < 5 \cdot 10^6$ , $0.5 \leq Pr < 2000$ , $(L/D) > 10$ , $f$ : Corr. 19 a 22 ó Ábaco de Moody (Gráfica 6.11)

30	$Nu_D = 4.82 + 0.0185 Re_D Pr^{0.827}$	Turbulento, metales líq., complet. desarrollado, $q'$ uniforme, $3600 < Re_D < 3.05 \cdot 10^5$ , $10^2 < Pr < 10^4$
31	$Nu_D = 5.0 + 0.025 Pe_D^{0.8}$	Turbulento, metales líq., complet. desarrollado, $T_s$ uniforme, $Pe_D > 100$

- La temperatura media de masa es la media aritmética de las temperaturas de masa  $T_m$ .
- Para las correlaciones (26) y (28) las propiedades se evalúan a la temperatura media de masa, salvo  $\mu_s$  que se evalúa a la temperatura superficial
- Las correlaciones (27) a (31) pueden utilizarse para calcular  $Nu$  medio en la zona de flujo completamente desarrollado. Si  $(L/D) > 10 \Rightarrow \overline{Nu}_D \approx \dots$ . Si  $(L/D) \leq 10$ , para el cálculo de  $\overline{Nu}_D$  ver: Incropera F.P., y DeWitt, D.P. "Fundamentos de Transferencia de Calor" 4ta edición pg. 446
- Las correlaciones para transferencia de masa pueden obtenerse sustituyendo en las correlaciones anteriores  $Nu$  y  $Pr$  por  $Sh$  y  $Sc$  respectivamente.

## 6 ANEXO II

Bajo todas las consideraciones previas, se recoge en el ANEXO adjunto un esquema del protocolo desarrollado. A su vez, se presentan dos versiones, una de alta precisión, y por tanto mayor costo computacional, y una de baja precisión para análisis semi-cuantitativo.





# 7 REFERENCIAS

---

- [1] «Directiva 2010/31/UE del Parlamento Europeo y del Consejo (refundición)».
- [2] [En línea]. Available: <http://ec.europa.eu/programmes/horizon2020/en/>.
- [3] P. P. d. Real. [En línea]. Available: [www.ocv.unia.es](http://www.ocv.unia.es).
- [4] B. B. Van Hoof T, «Coupled urban wind flow and indoor natural ventilation».
- [5] B. B. Ramponi R, «CFD simulation of cross-ventilation flow for different isolated building configurations: validation with wind tunnel measurements and analysis of physical and numerical diffusion effects.».
- [6] R. CL, «Daylighting design and analysis».
- [7] S. T. Karava P, «Airflow assessment in cross ventilated.».
- [8] B. H. J. A. Goethals K, «Sensitivity analysis of predicted night cooling performance to internal convective heat transfer modelling. Energy Build.».
- [9] C. I. D. P. D. T. C. K. Gorissen D, «A surrogate modeling and adaptive sampling toolbox for computer based design».
- [10] J. A. Breesch H, Performance evaluation of passive cooling in office.
- [11] N. PV, «Specification of a two dimensional test case».
- [12] S. H, vol. Uber das Verhalten ebener horizontaler Zuluftstrahlen.
- [13] P. M. S. M. H. A. Michels, Effect of biomass concentration on the productivity of *Tetraselmis suecica* in a pilot-scale tubular photobioreactor using natural sunlight, 2014.
- [14] A. S. Bellón, «Protocolo de cálculo CFD de coeficientes de transferencia de calor por convección en recintos,» Sevilla, 2013.
- [15] F. P. Incropera, Fundamentos de transmisión de calor.
- [16] *Mapa estratégico de ruido ciudad de Málaga*. [Performance]. Ayuntamiento de Málaga.
- [17] «Reglamento de Instalaciones Térmicas en edificios (RITE)».
- [18] Autor, «Este es el ejemplo de una cita,» *Tesis Doctoral*, vol. 2, nº 13, 2012.
- [19] O. Autor, «Otra cita distinta,» *revista*, p. 12, 2001.
- [20] F. Anselmet, «Axial development of the mean flow in the entrance region of turbulent pipe and duct

flows,» *C. R. Mecanique*, p. 582, 2009.

[21] S. T. A. A. Karava P, Airflow assessment in crossventilated.

[22] S. H., Über das Verhalten ebener horizontaler Zuluftstrahlen.

