

Proyecto Fin de Carrera
Ingeniería Industrial
Energía y Tecnología de Calor y Fluidos

**Diseño y modelado de un sistema de
dissipación de calor mediante Trnsys y
técnicas CFD**

Manel David Bosch Navío

Junio 2014

Director: Alejandro del Amo Sancho
Ponente: José María Marín Herrero

Departamento de Ingeniería Mecánica
Escuela de Ingeniería y Arquitectura
Universidad de Zaragoza

Diseño y modelado de un sistema de disipación de calor mediante Trnsys y técnicas CFD

RESUMEN

El progresivo auge de las energías renovables y el impulso gubernamental para su aplicación en el entorno de la construcción y la urbanización se manifiesta en la regulación de la instalación de captadores solares por medio del código técnico de la edificación. Sin embargo, dicha regulación no tiene en cuenta la posibilidad de saturación de la instalación captadora y tampoco se define completamente la resolución de esta situación mediante el sistema de disipación.

Teniendo en cuenta estos aspectos, el punto de partida de este proyecto es la necesidad de idear una torre de refrigeración para el sistema de disipación de la vivienda sostenible que representó a la Universidad de Zaragoza (Unizar Casa Pi) en el certamen mundial “Solar Decathlon Europe 2012”. Dicha vivienda disponía de un sistema de trigeneración cuyo núcleo era una máquina de adsorción y cuyas exigencias técnicas establecían un rango de temperaturas del sistema de disipación.

Con todo ello, el objetivo principal de este proyecto es el diseño justificado de un disipador de calor sumergido que cubra las exigencias de disipación mencionadas y garantice el correcto funcionamiento de la máquina de adsorción. Se valoran además como objetivos secundarios del proyecto la integración arquitectónica del dispositivo y el uso de la energía residual para refrigerar el aire cercano al disipador.

Para el desarrollo del diseño y la comprobación de las diferentes posibilidades de mejora, ha sido fundamental la utilización de una serie de herramientas:

- Mediante el programa *Trnsys* se consigue evaluar la situación inicial del problema y la posible resolución de dicho problema desde el punto de vista energético.
- Con la utilización de las técnicas CFD se contrastan los resultados anteriores, se proponen las mejoras oportunas y se valida el diseño propuesto.

De esta manera se consigue un disipador de calor alternativo a las torres de refrigeración convencionales y se añade a su principal función la posibilidad de refrigerar un espacio abierto, mejorando así el confort humano con respecto a la temperatura ambiente en el área de influencia de dicho disipador.

Agradecimientos

Me gustaría comenzar esta carta de agradecimientos mencionando la importancia de mi participación en el «Solar Decathlon Europe» con el equipo «Unizar Casa Pi» en el contenido de este proyecto. Esta oportunidad no habría sido posible sin el interés de Alejandro del Amo y la colaboración de «Endef Engineering». También me gustaría mencionar la contribución de mi ponente José María Marín durante todo el desarrollo de este proyecto.

Quiero mostrar mi más sincero agradecimiento a Pilar Brufau por su interés y orientación para desarrollar el proyecto, así como a José Ignacio García por sus consejos y su sinceridad.

Por último, pero no menos importante me gustaría dar las gracias a mi familia que durante todo este tiempo ha compartido conmigo las subidas y bajadas de la montaña rusa que ha sido este proyecto. Quiero agradecer a Carlos que desde la primera línea hasta la última ha estado siempre presente.

Sobretodo quiero dar las gracias a Adriana por su paciencia, su tenacidad y su apoyo en cada una de las infinitas horas dedicadas. Gracias por no dejarme abandonar.

Índice

Resumen	I
Índice de figuras	VII
Índice de tablas	IX
1. Introducción	1
1.1. Motivación	1
1.2. Origen de la idea	2
1.3. Alcance del proyecto y condiciones	3
1.3.1. Condiciones técnicas	3
1.3.2. Condiciones de fabricación	3
1.4. Estructura de la memoria	4
2. Plan de diseño	5
2.0.1. Situación actual	5
2.0.2. Máquina de adsorción	5
2.0.3. Ubicación	5
2.1. Conceptos previos	6
2.1.1. Teoría básica de la aerodinámica	6
2.1.2. Transferencia de calor	7
2.1.3. Psicrometría	8
2.1.4. Mecánica de fluidos computacional (CFD)	10
2.2. Necesidades técnicas	11
2.2.1. Función primaria	11
2.2.2. Función secundaria	11
2.3. Propuesta de soluciones	12
2.3.1. Reflexión sobre el estado inicial	12
2.3.2. Posibles diseños	13
2.4. Solución propuesta	16
2.4.1. Arquitectura del dispositivo	17
3. Simulaciones numéricas	18
3.1. Cálculos térmicos orientativos	18
3.1.1. Cálculo de la refrigeración evaporativa	18
3.1.2. Simulación térmica en Trnsys	19

3.2. Obtención del modelo CAD	20
3.3. Mecánica de fluidos computacional	20
3.3.1. Fluido gaseoso	21
3.3.2. Fluido líquido	23
4. Resultados finales	26
4.1. Cálculos térmicos orientativos	26
4.2. CFD: Fluido gaseoso	28
4.3. CFD: Fluido líquido	30
5. Conclusiones Generales	33
5.1. Líneas futuras	33
5.2. Consideraciones finales	34
Bibliografía	35
A. Trnsys	37
A.1. Modelo del problema en Trnsys	37
A.2. Módulos de cálculo del modelo	38
A.2.1. Type 9	38
A.2.2. Type 65c	39
A.2.3. Type 531	40
A.3. Documentación Oficial	43
A.3.1. Trnsys Manual. Capítulo 3 Type 9 y Type 65c	44
A.3.2. Trnsys Manual. Capítulo 4 Type 9 y Type 65c	48
A.3.3. T.E.S.S. Library Type 531	52
A.3.4. Hoja técnica máquina de adsorción Sortech AC08	69
A.3.5. Hoja técnica relleno de torre FKP 312/612	72
A.3.6. Hoja técnica radiador	75
B. Modelado CAD	76
B.1. Solidworks	76
B.2. Hilti Profis	78
B.3. Ensamblaje	80
C. Guía para Autodesk Flow Desing	81
C.1. Representación	83
C.2. Documentación Oficial	86
D. OpenFOAM	88
D.1. Estructura de archivos	89
D.2. Aplicación al proyecto	92
D.2.1. Caso práctico motorBike	92
D.3. Resultados	93
D.4. Tutorial de postprocesado: Paraview	94
E. Autodesk Simulation CFD 2014	98

Índice de figuras

1.1. Unizar Casa Pi	2
1.2. Intercambiador sumergido Casa Pi	2
2.1. Climograma de Baruch Givoni	9
2.2. Diagrama conceptual refrigeración evaporativa	10
2.3. Diseño inicial del disipador de calor	13
2.4. Evolución del disipador de calor: Pilar central y set de hilos	14
2.5. Modelo inicial sometido al túnel de viento	15
2.6. Modelo final sometido al túnel de viento	15
2.7. Circulación del fluido refrigerante en el disipador	16
2.8. Diseño propuesto para el disipador.	17
3.1. Estructura de archivos de un caso básico en OpenFOAM	21
3.2. Imagen de un corte de la malla 3D en OpenFOAM	22
4.1. Gráficas de representación para los números de Merkel	26
4.2. Resultados del cálculo en <i>Trnsys</i>	27
4.3. Resultados de la comparativa en <i>Autodesk Flow Design</i>	28
4.4. Resultados del cálculo en <i>OpenFOAM</i>	29
4.5. Resultados del cálculo en <i>OpenFOAM</i> del modelo con ventilador	30
4.6. Resultados del cálculo en <i>Autodesk Simulation CFD 2014</i> del funcionamiento normal para circulación forzada y natural del fluido secundario respectivamente	31
4.7. Resultados del cálculo en <i>Autodesk Simulation CFD 2014</i> del funcionamiento en disipación para circulación forzada y natural del fluido secundario respectivamente	32
5.1. Imágenes virtuales de la integración arquitectónica del proyecto.	34
A.1. Modelo de <i>Trnsys</i>	37
A.2. Cambio de modo de funcionamiento en el modelo.	38
A.3. Ventana de configuración del «type» 9 de <i>Trnsys</i>	38
A.4. Ventana de configuración para exportar resultados del «type» 65c de <i>Trnsys</i>	39
A.5. Ventana de configuración del gráfico del «type» 65c de <i>Trnsys</i>	39
A.6. Ventana de configuración de los parámetros del «type» 531 de <i>Trnsys</i>	40
A.7. Ventana del plug-in configuración del «type»531 de <i>Trnsys</i>	42
B.1. Piezas diseñadas ex profeso: estanque	77

B.2. Piezas diseñadas ex profeso: pared y techo	77
B.3. Detalle del diseño de los pilares	78
B.4. Librería BIM/CAD del programa Hilti Profis	79
B.5. Estructura interna del prototipo	79
B.6. Vista explosionada del ensamblaje completo.	80
C.1. Menú de inicio del programa <i>Autodesk Flow Desing</i>	81
C.2. Representación por defecto en <i>Autodesk Flow Desing</i>	82
C.3. Representación de la pestaña <i>wind tunnel</i> en <i>Autodesk Flow Desing</i>	82
C.4. Representación de la pestaña <i>2D/3D</i> en <i>Autodesk Flow Desing</i>	83
C.5. Representación de la pestaña <i>velocity/pressure</i> en <i>Autodesk Flow Desing</i>	83
C.6. Representación del coeficiente de arrastre en <i>Autodesk Flow Desing</i>	84
C.7. Representación de la visualización tipo <i>plane</i> <i>Autodesk Flow Desing</i>	84
C.8. Representación de la visualización tipo <i>flow lines</i> <i>Autodesk Flow Desing</i>	85
C.9. Representación del plano horizontal en <i>Autodesk Flow Desing</i>	85
D.1. Página Web www.openfoam.com	88
D.2. Estructura de archivos de un caso genérico en <i>OpenFOAM</i>	90
D.3. Malla superficial del caso práctico motorBike en <i>OpenFOAM</i>	92
D.4. Resultados del caso práctico motorBike en <i>OpenFOAM</i>	93
D.5. Resultados del caso del proyecto en <i>OpenFOAM</i>	93
D.6. Imágenes de la selección de la malla a representar en <i>Paraview</i>	94
D.7. Imagen de la función <i>Extract Block</i> a representar en <i>Paraview</i>	95
D.8. Imágenes de la función <i>Clip</i> a representar en <i>Paraview</i>	95
D.9. Imagen de la función <i>Steam Tracer</i> a representar en <i>Paraview</i>	96
D.10. Imágenes del plano de resultados añadido sobre la representación en <i>Paraview</i>	96
D.11. Imagen de la representación final en <i>Paraview</i>	97
E.1. Pantalla principal del programa <i>Autodesk Simulation CFD 2014</i>	98
E.2. Pestañas de las funciones <i>Edge Merge</i> y <i>Small Object</i> del programa <i>Autodesk Simulation CFD 2014</i>	99
E.3. Pestañas de las funciones <i>Void Fill</i> y <i>Ext. Volume</i> del programa <i>Autodesk Simulation CFD 2014</i>	100
E.4. Ejemplo de especificación de materiales en el programa <i>Autodesk Simulation CFD 2014</i>	101
E.5. Ejemplo de aplicación condiciones de contorno en el programa <i>Autodesk Simulation CFD 2014</i>	101
E.6. Ejemplo de mallado automático en el programa <i>Autodesk Simulation CFD 2014</i>	102
E.7. Ventanas de selección de cálculo del programa <i>Autodesk Simulation CFD 2014</i>	102
E.8. Representación de resultados en un plano en el programa <i>Autodesk Simulation CFD 2014</i>	103
E.9. Representación de resultados en trazas en el programa <i>Autodesk Simulation CFD 2014</i>	104
E.10. Representación de resultados en isosuperficies en el programa <i>Autodesk Simulation CFD 2014</i>	104

Índice de tablas

2.1. Tabla de necesidades técnicas: Función primaria.	11
3.1. Tabla de balance radiativo en el volumen fluido del prototipo	19
3.2. Tabla de resultados al refinar la malla en OpenFOAM	22
3.3. Tabla de condiciones de contorno a imponer en el <i>Autodesk Simulation CFD 2014</i>	24
3.4. Tabla de parámetros para la orden <i>solve</i> de <i>Autodesk Simulation CFD 2014</i>	25
4.1. Tabla de datos de entrada y salida de la torre de refrigeración utilizados en la hoja de <i>Excel</i>	27
4.2. Tabla de resultados del cálculo en <i>Trnsys</i>	28
4.3. Tabla de resultados de la simulación en <i>Autodesk Simulation CFD 2014</i>	30
4.4. Tabla de tiempos de convergencia de las simulaciones en <i>Autodesk Simulation CFD 2014</i>	31
B.1. Tabla de referencias Hilti utilizadas.	79

1. Introducción

1.1. Motivación

A lo largo de los años, el trabajo y la investigación han permitido alcanzar diversas mejoras en el desarrollo de las energías renovables. El aprovechamiento de los recursos energéticos así como la obtención de una progresiva independencia energética de fuentes exteriores se han convertido en una importante prioridad, tanto ambiental como económica.

España es un país que recibe iluminación solar durante un elevado número de horas al año, lo que llevó a regular mediante el código técnico de la edificación una cobertura mínima de agua caliente sanitaria producida por captación térmica. Este requisito mínimo se expresa en porcentaje energético de ahorro y en la práctica representa un número de metros cuadrados de superficie de captación térmica.

Esta regulación no tiene en cuenta la posibilidad de saturación de la instalación, por lo que si se da esta situación el técnico se ve obligado a limitar la producción cubriendo los captadores o mediante la instalación de una torre de refrigeración o de un sumidero de energía como soluciones. Estas dos últimas opciones generalmente implican un gasto energético, lo que provocaría pérdidas económicas en la instalación causadas por la situación de saturación.

En este estudio se busca enriquecer la última solución, diseñando un sumidero de energía cuya función secundaria sea la de refrigerar una corriente de aire cercana al dispositivo. Para desarrollar el diseño no se considerará la posibilidad de realizar una comprobación experimental de las simulaciones realizadas, ya que los cálculos que se realicen tienen como objetivo conocer los flujos energéticos mediante *Trnsys* y las condiciones de los fluidos mediante técnicas CFD.

Como motivación final del proyecto destaca la posibilidad de utilizar las conclusiones como base para estudios y/o aplicaciones posteriores.

1.2. Origen de la idea

La idea inicial del proyecto surge a raíz de la participación del equipo «Unizar Casa Pi» en el certamen mundial de diseño y construcción de prototipos de vivienda sostenible «Solar Decathlon Europe 2012» (ver figura 1.1). Con motivo de dicha competición y con el objetivo de cubrir las necesidades técnicas de las instalaciones térmicas de la vivienda, se desarrolló el diseño de un disipador de calor sumergido en agua.

La climatización se realizó mediante un sistema de trigeneración con máquina de adsorción, dicha máquina provoca dos situaciones distintas de disipación: funcionamiento y saturación. En dichas situaciones se utiliza el disipador con el propósito de evacuar el calor para garantizar el correcto funcionamiento de toda la instalación térmica de la vivienda.



Figura 1.1: Imagen virtual del proyecto (izda.) y fotografía del proyecto ejecutado (drcha). *Imágenes extraídas de la documentación oficial Solar Decathlon Europe 2012*

En el proyecto se disponía de unos estanques para realizar la fitodepuración de $10\ m^3$ de agua. Esto se aprovechó para utilizar dicho volumen de fluido como torre de refrigeración, sumergiendo intercambiadores de calor como se puede observar en la figura 1.2.



Figura 1.2: Fotografía del proceso de llenado de los estanques con el intercambiador sumergido. *Imágenes extraídas de la documentación oficial Solar Decathlon Europe 2012*

Tras esta experiencia se consideró que el diseño propuesto no resolvía una serie de interrogantes técnicos: la resolución técnica, la ejecución práctica del diseño, la integración arquitectónica o los usos secundarios de esa energía. Las soluciones a los aspectos anteriores se desarrollan y forman el contenido del presente proyecto.

1.3. Alcance del proyecto y condiciones

Tomando como punto de partida los trabajos efectuados previamente para el diseño relativo a la Casa Pi, se desea obtener un diseño orientativo del sumidero de energía. Para ello se partirá de la configuración de la instalación térmica instalada en el prototipo del certamen «Solar Decathlon Europe 2012» y de sus necesidades técnicas, con el objetivo de alcanzar una solución concluyente para las decisiones sobre el diseño, los materiales, etc. Es importante mencionar que todas las decisiones tomadas estarán respaldadas por una adecuada base teórica.

Son varios los puntos clave a tratar:

- Estado Inicial. Análisis de las necesidades de disipación energética de la instalación.
- Propuesta de alternativas prácticas al problema y evaluación de cada una de ellas en base a criterios técnicos.
- En base a la solución final propuesta, prever una integración arquitectónica.

No son objetivos de este proyecto el diseño en detalle de cada una de las piezas integradas en el conjunto, el estudio estructural del diseño, el diseño del circuito eléctrico y/o de control, la elección específica de materiales ni el estudio de obra civil en el caso de que lo hubiese.

Tras una primera toma de contacto con el proyecto, se establece una serie de condiciones generales para el diseño del dispositivo, clasificadas en dos apartados: condiciones técnicas y condiciones de fabricación.

1.3.1. Condiciones técnicas

- **Diseño de disipación primario:** teniendo en cuenta la estructura de la instalación previa, el sumidero de energía deberá satisfacer las necesidades de disipación de energía en los rangos de temperatura necesarios para el buen funcionamiento de la máquina de adsorción, así como disipar la potencia de entrada necesaria en momentos de saturación de la instalación.
- **Buen comportamiento térmico:** se procurará que la inercia térmica del sumidero sea equilibrada buscando el menor consumo externo de energía.
- **Utilización de la energía residual:** se diseñará una instalación para el uso residual de la energía disipada con el objetivo de alcanzar una comodidad ambiental en la cercanía del dispositivo.
- **Integración arquitectónica:** el diseño, y los posibles desarrollos de este, deberán ser integrables arquitectónicamente en un edificio.

1.3.2. Condiciones de fabricación

- **Diseño sencillo:** se busca desarrollar un diseño sencillo a partir de piezas simples y de un montaje fácil.

1.4. Estructura de la memoria

En esta memoria se intenta resumir de la forma más breve posible todo el trabajo realizado a lo largo del desarrollo del proyecto. No obstante, a los lectores interesados en la temática aquí tratada se les anima a consultar la información disponible en los anexos.

El contenido de esta memoria está dividido en 5 capítulos cuyo argumento se especifica a continuación:

- **Capítulo 1:** se indican las razones que han motivado el desarrollo de este proyecto y los objetivos que se pretenden alcanzar.
- **Capítulo 2:** se muestran los conceptos básicos relacionados con la aerodinámica, la transferencia de calor, la psicrometría y el cálculo computacional. Se incluyen además las necesidades a cubrir por el dispositivo diseñado y el desarrollo de dicho dispositivo desde el prototipo inicial hasta el modelo final. Se incluyen también los criterios considerados para alcanzar dicho diseño final.
- **Capítulo 3:** se explican las simulaciones realizadas indicando los parámetros y características de cada una de ellas.
- **Capítulo 4:** se exponen los cálculos más representativos realizados mediante el programa *Trnsys* y técnicas CFD.
- **Capítulo 5:** se enuncian posibles líneas de desarrollo futuro y se explican las consideraciones finales del proyecto mostrando la integración arquitectónica del diseño.

Para profundizar en diferentes aspectos del proyecto se invita a la lectura de los anexos cuya materia se detalla a continuación:

- **Anexo A:** se explica en detalle el cálculo realizado mediante el programa informático *Trnsys*.
- **Anexo B:** se muestran el proceso de modelado en CAD con el programa *Solidworks* y el catálogo virtual *Hilti Profis* para los diferentes diseños y piezas consideradas.
- **Anexo C:** se expone una guía de usuario para *Autodesk Flow Design* aplicada al proyecto y a las geometrías seleccionadas.
- **Anexo D:** se indica el proceso realizado para resolver el cálculo mediante *OpenFOAM* y se detalla un breve tutorial de postprocesado de los resultados.
- **Anexo E:** se describen las directrices seguidas en el entorno *Autodesk Simulation CFD 2014* para la realización del proyecto.

2. Plan de diseño

Bajo este epígrafe se desea resumir el trabajo previo que se ha tomado como punto de partida para la realización del proyecto.

2.0.1. Situación actual

La trigeneración es el sistema energético objetivo de este estudio. Generalmente el núcleo de este sistema es una máquina de adsorción o absorción. En la instalación de la Casa Pi se seleccionó una máquina de adsorción debido a que la temperatura de entrada es inferior a la requerida por la de absorción lo que conlleva que los paneles solares trabajen a menor temperatura y por lo tanto tengan mejor rendimiento, tanto térmico como fotovoltaico.

El inconveniente del uso de estas máquinas es el elevado consumo energético de sus torres de refrigeración. El proyecto se centrará en estudiar este aspecto y buscar una posible mejora energética desarrollando alguna alternativa de menor consumo.

2.0.2. Máquina de adsorción

Se dispone de una máquina de adsorción modelo *Sortech AC08* con una potencia nominal de refrigeración de 8 kW y un consumo de 7 W (ficha técnica en el apartado A.3). Los requisitos técnicos respecto a las temperaturas y caudales del fluido del circuito de suministro de energía así como el retorno de este fluido serán los parámetros clave en la función primaria del disipador.

2.0.3. Ubicación

Se ha considerado que para todos aquellos cálculos que tengan como base las condiciones climáticas se tomará como referencia la ciudad de Zaragoza.

En el presente estudio se toman los datos públicos más representativos. En concreto entre todos los datos recogidos, se registró el año 2006 como el de mayor temperatura y mayor incidencia solar. Esto implicaría un mayor número de horas de funcionamiento del dispositivo y una mayor probabilidad de saturación del sistema. Por lo que se usan los datos de este año como referencia.

Para la consulta de estos datos climáticos obtenidos en las referencias [1] y [2] se puede acudir al Cd anexo al final del presente proyecto.

2.1. Conceptos previos

En esta sección se busca explicar los principios básicos de los conceptos a los que se hace referencia a lo largo de todo el proyecto.

2.1.1. Teoría básica de la aerodinámica

La aerodinámica es la rama de la mecánica de fluidos que se ocupa del estudio de las acciones ejercidas por el aire y otros fluidos gaseosos sobre los cuerpos sólidos cuando existe un movimiento relativo entre ellos.

La presencia de un cuerpo en un fluido gaseoso modifica los campos de presión y velocidad del mismo fluido, lo que a su vez conlleva la aparición de una serie de fuerzas aerodinámicas en el objeto ejercidas por dicho fluido. Es importante destacar que no importa si es el objeto lo que se está desplazando en el seno del fluido o si es el propio fluido el que se encuentra en movimiento. Es decir, las fuerzas aerodinámicas dependen del movimiento relativo entre el cuerpo y el fluido.

En el análisis del caso en el que existe un desplazamiento relativo entre un objeto en el seno de un fluido y el mismo fluido se observan dos fuerzas. Estas fuerzas son las proyecciones en los ejes de la fuerza resultante de sumergir el objeto de estudio en el fluido.

Estas fuerzas aerodinámicas son de sustentación (\vec{L} = Lift) y de resistencia o arrastre (\vec{D} = Drag) definidas a continuación:

- La sustentación (\vec{L}) es la fuerza generada sobre un cuerpo en dirección perpendicular a la velocidad relativa del fluido.
- La resistencia aerodinámica (\vec{D}) es la fuerza que se opone al movimiento entre cuerpo y fluido, siguiendo la misma dirección que la velocidad relativa del fluido.

A la hora de cuantificar estas fuerzas son muchos los factores que influyen en su valor final. De este modo, para facilitar la comparación entre las distintas situaciones de estudio se utilizan coeficientes adimensionales al igual que en muchas otras ramas de la mecánica de fluidos. Estos coeficientes y su relación con las fuerzas de sustentación y de arrastre se definen a continuación:

$$C_L = \frac{L}{\frac{1}{2}\rho V^2 S} \cong f(\alpha, Re) \text{ Coeficiente de sustentación}$$

$$C_D = \frac{D}{\frac{1}{2}\rho V^2 S} \cong f(\alpha, Re) \text{ Coeficiente de arrastre}$$

L: Fuerza de sustentación.

D: Fuerza de resistencia aerodinámica.

ρ : Densidad del fluido gaseoso.

V: Velocidad relativa entre el cuerpo y el fluido.

S: Superficie característica.

α : Ángulo de ataque.

Re: Número de Reynolds. Número adimensional que relaciona las fuerzas dinámicas con las fuerzas debidas a la viscosidad.

$$Re = \frac{\rho v D}{\mu}$$

ρ : Densidad del fluido gaseoso.

v : Velocidad relativa entre el cuerpo y el fluido.

D : Superficie característica.

μ : Viscosidad dinámica del fluido gaseoso.

En los casos de estudio, los objetos serán sometidos a una corriente de fluido para observar su capacidad de frenar y retener en su interior el fluido. Por este motivo, el factor clave en los diferentes estudios será el coeficiente de arrastre.

2.1.2. Transferencia de calor

En el presente proyecto se abordan diferentes conceptos relacionados con las principales formas de transferencia de calor.

- **Conducción.** La conducción es el fenómeno físico de transferencia de calor que se produce a través de un medio estacionario cuando existe una diferencia de temperatura.
- **Convección.** La convección es una forma de transferencia de calor que se caracteriza por producirse en el seno de un fluido (líquido o gas) que transporta calor entre zonas con diferentes temperaturas.
- **Radiación.** La radiación es la energía emitida por un cuerpo por el hecho de estar a una determinada temperatura. Todos los cuerpos emiten radiación electromagnética, siendo su intensidad dependiente de la temperatura y de la longitud de onda considerada. Este mecanismo de transferencia está caracterizado principalmente por las siguientes leyes:
 - La intensidad de la radiación emitida por un cuerpo negro con una cierta temperatura T y frecuencia ν , $I(\nu, T)$ está cuantificada por la **ley de Plank**.

$$I(\nu, T) = \frac{2h\nu^3}{c^2} \frac{1}{e^{\left(\frac{h\nu}{kT}\right)} - 1}$$

I : Cantidad de energía por unidad de superficie, unidad de tiempo y unidad de ángulo sólido por unidad de frecuencia o longitud de onda (tal como se especifique).

ν : Frecuencia en Hz.

T : Temperatura del cuerpo negro en K.

h : Constante de Plank $h \approx 6.62606896 \times 10^{-34}$ J*s.

c : Velocidad de la luz.

k : Constante de Boltzmann $k \approx 1.3806504 \times 10^{-23}$ J/K.

- La **ley de desplazamiento de Wien** es una ley física. Determina que hay una relación inversa entre la longitud de onda a la que se produce el pico de emisión de un cuerpo negro y su temperatura.

$$\lambda_{max} = \left(\frac{0,0028976}{T} \right)$$

T : Temperatura del cuerpo negro en K.

λ_{max} : Longitud de onda del pico de emisión en m.

- La **ley de Stefan-Boltzmann** establece que un cuerpo negro emite radiación térmica con una potencia emisiva hemisférica total (W/m^2) proporcional a la cuarta potencia de su temperatura.

$$E = \sigma * T_e^4$$

T_e : Temperatura absoluta de la superficie K.

σ : Constante de Stefan-Boltzmann $\sigma = 5.87 * 10^{-8} \frac{W}{m^2 * K^4}$.

Como esta potencia emisiva supone un ideal superior a los cuerpos reales se introduce el concepto emisividad (ϵ). Esta propiedad es la relación entre la radiación emitiva por una superficie real y la emitida por el cuerpo negro a la misma temperatura. Teniendo en cuenta esta consideración, la potencia emisiva real será:

$$E = \epsilon * \sigma * T_e^4$$

T_e : Temperatura absoluta de la superficie K.

σ : Constante de Stefan-Boltzmann $\sigma = 5,87 * 10^{-8} \frac{W}{m^2 * K^4}$.

ϵ : Constante de emisividad. $0 \leq \epsilon \leq 1$

2.1.3. Psicrometría

La psicrometría es la rama de la ciencia que estudia las propiedades termodinámicas del aire húmedo así como el efecto de la humedad atmosférica en los materiales y en el confort humano. En relación con su temperatura, el aire tiene la propiedad de retener cierta cantidad de vapor de agua.

Por medio de diagramas psicrométricos se relacionan los diferentes parámetros referentes a una mezcla de aire húmedo: temperatura, humedad relativa, humedad absoluta, punto de rocío, entalpía específica o calor total, calor sensible, calor latente y volumen específico del aire.

2.1.3.1. Confort humano

El «confort higrotérmico», o más concretamente «comodidad higrotérmica» se define como la ausencia de malestar térmico. La sensación de comodidad surge de la generación de un microclima que evite que el cuerpo invierta energía en regular su temperatura mediante un proceso denominado «termorregulación natural» opuesto al concepto de abrigo que se considera un fenómeno de «termorregulación artifical».

Un organismo debe mantenerse en una temperatura constante para evitar cambios bruscos de temperatura. Con este objetivo, cada organismo posee mecanismos de evacuación del calor residual. En concreto los 4 mecanismos principales son convección, conducción, radiación y evaporación. Las tres primeras formas de transmisión se refieren al calor sensible, mientras que la evaporación se refiere al calor latente. A fin de que la temperatura interna del hombre permanezca constante, el balance térmico que contempla aportes y pérdidas de calor debe permanecer también constante.

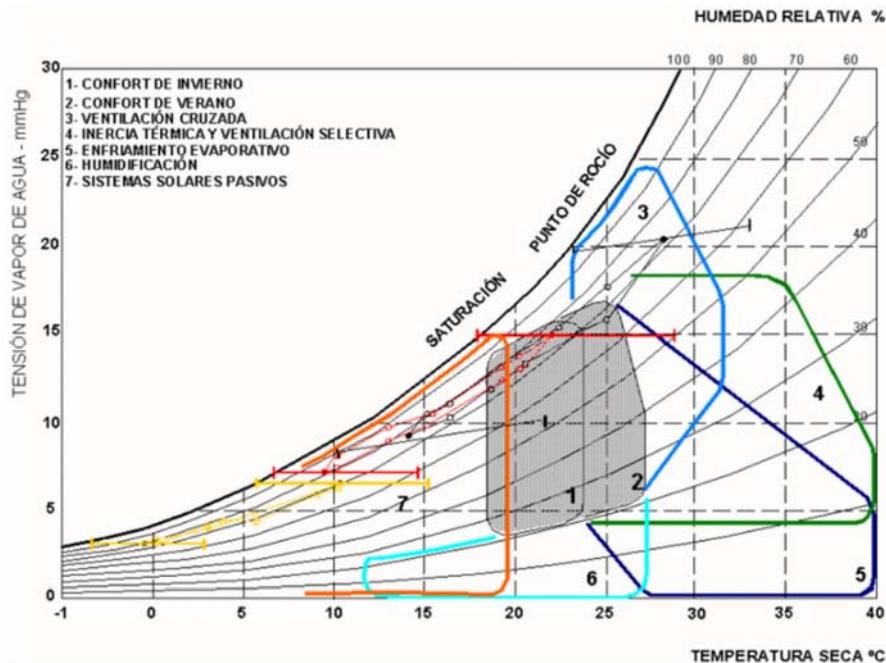


Figura 2.1: Climograma de Baruch Givoni aplicado a los climas húmedos y muy cálidos, templados y muy fríos

La figura 2.1 muestra el climograma de B. Givoni aplicado a los climas húmedos de Argentina. El diagrama toma el origen en los valores correspondientes a un clima muy frío y sus máximos correspondiendo a uno muy cálido. En la gráfica se representan las diferentes propiedades del aire. Las zonas sombreadas son las áreas asociadas a los valores de confort humano con respecto a esas propiedades aunque no son las únicas variables de las que depende la «comodidad higrotérmica» ya que también depende de la relación térmica y/o de la velocidad del aire.

En el presente estudio se fijarán los valores de humedad relativa y temperatura ambiente según las áreas de confort del climograma, marcando así los valores límite de los procesos psicrométricos.

2.1.3.2. Refrigeración evaporativa

El enfriamiento evaporativo es un proceso adiabático, sin intercambio de calor con el exterior y a entalpía constante. Se sabe que el calor total es la suma del calor sensible (calor percibido por el ser humano) y el calor latente (calor no percibido).



Figura 2.2: Diagrama conceptual referente al proceso de refrigeración evaporativa.

En la figura 2.2 el rectángulo de la izquierda representa un volumen de aire antes de ser tratado por el sistema evaporativo en un estado genérico. El calor total mostrado se divide en dos tercias partes de calor sensible y una tercera parte de calor latente. El rectángulo de la derecha representa el mismo volumen después del proceso de refrigeración evaporativa (proceso adiabático). Se observa que el calor total no ha variado (proceso a entalpía constante) pero sí lo ha hecho el calor sensible reduciéndose a un tercio del total mientras que el calor latente ha aumentado a dos tercios disminuyendo la temperatura del aire.

2.1.4. Mecánica de fluidos computacional (CFD)

La mecánica de fluidos computacional o *Computational Fluid Dynamics* (CFD) es una de las ramas de la mecánica de fluidos que utiliza métodos numéricos y algoritmos para resolver y analizar problemas relacionados con el flujo de líquidos y gases.

Para resolver problemas mediante estas técnicas se utilizan ordenadores que realizan los cálculos necesarios para simular la interacción entre los fluidos y los objetos de interés desde el punto de vista de la ingeniería.

Para validar las conclusiones basadas en los cálculos obtenidos es aconsejable la verificación de los resultados numéricos procedentes del cálculo final y certificar así el desarrollo llevado a cabo sobre el prototipo y su diseño final. Así comprobando dichos resultados en túneles de viento u otros modelos físicos a escala, o mediante comparación con resultados publicados de experimentos similares al de estudio es posible evaluar el grado de precisión obtenido como resolución del problema planteado, confirmando el modelo matemático y el mallado del sistema.

El análisis mediante técnicas de CFD sigue un proceso específico:

- En primer lugar es necesario plantear desde un punto de vista técnico el problema a estudiar: definir la geometría, formular las ecuaciones que definen el sistema y determinar las condiciones de contorno que lo caracterizan.
- El siguiente paso consiste en la división de la geometría que caracteriza al sistema en pequeños volúmenes de control. Esto se conoce como mallado del sistema. Durante la generación de la malla, una división del dominio en un número mayor de partes supone generalmente un resultado más preciso y como consecuencia el coste computacional aumenta. En el momento en el que se dispone del sistema mallado se procede a la resolución numérica de las ecuaciones.

- Para poder alcanzar una solución se necesita realizar una serie de aproximaciones a la hora de realizar los cálculos. Cada una de las variables (ρ , u, v, ω , p , ...) se aproxima por un número finito de valores de nodos (puntos situados en el interior de los volúmenes de control). Este proceso se conoce como discretización de las variables. Las ecuaciones que caracterizan el flujo también se discretizan, realizando para ello una serie de aproximaciones a partir de los valores en los nodos. Así las ecuaciones integrales de variables continuas se transforman en ecuaciones algebraicas de variables discretizadas.
- Resolución del sistema de ecuaciones algebraicas obteniendo los valores de las variables en cada uno de los nodos del malla. El proceso de cálculo finaliza cuando se alcanza un número de iteraciones o un nivel de precisión, ambos previamente fijados.
- Análisis de los resultados numéricos obtenidos. La validez del resultado numérico final depende de multitud de factores relativos al cálculo computacional. Entre ellos destacan: complejidad de la geometría, tipología y número de divisiones del malla, discretización de variables, modelos físicos y ecuaciones empleadas, errores globales y máximos permitidos en cada una de las variables, número máximo de iteraciones y coeficientes de relajación.

2.2. Necesidades técnicas

En este apartado se definen las necesidades técnicas que deberá cubrir el diseño planteado incluyendo los requisitos de la instalación existente, los límites de «confort higrotérmico» y las condiciones climáticas para la localización indicada.

2.2.1. Función primaria

Los requisitos técnicos para la máquina de adsorción que deberán ser satisfechos por el disipador se muestran en la tabla 2.1. El diseño propuesto cubrirá la función primaria del disipador garantizando estos valores u otros más favorables.

	$T_{\text{entrada}}^{\circ}\text{C}$	$T_{\text{salida}}^{\circ}\text{C}$	Caudal m^3/h	Pot. disipada kW
Funcionamiento	32	26	3.7	21.5
Saturación	72	65	1.6	13.5

Tabla 2.1: Tabla de necesidades técnicas: Función primaria.

2.2.2. Función secundaria

La función secundaria se desarrollará principalmente gracias a una serie de caídas de agua y a la transferencia de agua al aire. La parametrización de esa etapa del flujo deberá aproximarse a la proporcionada por el fabricante «J.Negre C. S.L». En nuestro caso, la recomendación profesional es el modelo *FKP 312/612* (Hoja técnica disponible en anexo A) de medida 600 mm y cuya curva experimental es la siguiente:

$$Me = 1.63 * \lambda^{0.6}$$

λ : Cociente entre el caudal de aire y el de líquido.

Me : Número de Merkel. Número adimensional que caracteriza el relleno de una torre de refrigeración.

Respecto a los límites marcados por los climogramas de B. Givoni previamente comentados, en el caso que nos ocupa se ha tomado como límite una humedad relativa del 70 %, ya que si se observa el límite de la zona de confort marcado por el climograma de B. Givoni en la figura 2.1, el mismo está bordeado por la linea del 80 % de humedad relativa. Por esto, si se fija un límite ligeramente inferior los valores se mantendrán dentro de la zona de interés sin comprometer las conclusiones del cálculo.

Otro requisito que se deberá tener en cuenta a la hora de realizar el cálculo, es el efecto solar y en concreto el efecto radiativo explicado en la página 7

Un factor importante a considerar es el hecho de que durante un periodo de tiempo el agua del prototipo carecerá de movimiento y en ese tiempo podría existir un incremento de temperatura. Esta circunstancia obliga a valorar el ciclo de vida de la legionela (*legionella pneumophila*) y otros patógenos en función de la temperatura, buscando que la temperatura del volumen fluido disipante no alcance los valores de crecimiento óptimos ($35 < T < 46$ °C) para la bacteria. De esta forma con el diseño se busca evitar o ralentizar lo máximo posible que la bacteria de desarrolle en caso de que el sistema de desinfección a instalar fallase.

2.3. Propuesta de soluciones

Una vez recopilada toda la documentación relacionada con el proyecto, se ha llevado a cabo una reflexión acerca de la experiencia en la instalación en la Casa Pi de manera que nos permita tener un conocimiento previo a la propuesta de varias arquitecturas para el dispositivo y a la elección de los materiales a emplear.

2.3.1. Reflexión sobre el estado inicial

El diseño previo fruto del estudio de los condicionantes técnicos, ha llevado a proponer la geometría de base en la que se fundamenta el presente trabajo. Esta reflexión se ha enfocado en tres aspectos: la reducción de consumo de la torre de refrigeración, la utilidad del calor residual disipado y la integración arquitectónica de la propuesta.

- Con respecto a la arquitectura general, se considera la imposibilidad de que en todas las viviendas pueda instalarse un estanque por lo que se dispone de una piscina prefabricada de menor tamaño, se optimiza el intercambiador de calor añadiéndole aletas (aumentando así su superficie de contacto con el fluido disipante) y se busca la reducción de consumo respecto a una torre de refrigeración habitual.
- El diseño de la función secundaria es uno de los puntos clave a tener en cuenta. Se utiliza el calor residual para bajar la temperatura del espacio cercano al dispositivo mediante un proceso psicrométrico de humidificación del aire.

- Por último, se ha buscado una integración arquitectónica mediante el uso de circulaciones y/o caídas de agua sobre el dispositivo o sobre la arquitectura del propio edificio.

No obstante, el detalle de la geometría de base o de las evoluciones de dicha geometría no ha sido objeto de estudio, ya que, se entiende que el comportamiento del diseño optimizado en detalle no debería suponer una variación notable sobre la situación propuesta. Sin embargo, la propuesta de diseño sí podría resultar optimizable en estudios posteriores.

Cabe destacar que el diseño propuesto constituye en sí mismo un condicionante a la hora de fabricarlo: la geometría propuesta debe de poderse fabricar muy fácilmente y a partir de un montaje sencillo, para así abaratar los costes de su posible implementación en las instalaciones de climatización. Por esta razón, se elige plástico de forma genérica para la mayor parte de las piezas estructurales exteriores y por piezas de catálogo para las estructuras sumergidas.

2.3.2. Posibles diseños

Teniendo en cuenta las necesidades técnicas y las reflexiones anteriores se propone una solución basada en la inmersión de radiadores en un estanque. Para realizar una circulación del fluido confinado se bombeará dicho fluido desde el fondo del estanque hasta el techo del prototipo. En concreto, el fluido descenderá por gravedad adherido a las paredes de los pilares, realizando la función de caída de agua o cascada sobre el estanque situado bajo el techo. Es en esas cascadas y en la superficie abierta del estanque donde se realizará la refrigeración evaporativa del aire. Debido a este proceso físico la temperatura del aire en las inmediaciones del prototipo descenderá .

El requisito principal para el diseño es la posibilidad de que sea integrable en terrazas y jardines, para ello la caída de agua se plantea con una geometría sencilla y simétrica de cascadas.



Figura 2.3: Diseño inicial de la geometría del disipador de calor.

Como se ve en la figura 2.3 el espacio central queda poco aprovechado por lo que se proponen dos evoluciones al diseño.

- Se valora la opción de incluir un pilar central que respete la simetría y dirija el flujo hacia la parte interna de los pilares incluidos en la geometría inicial, así aumenta la superficie de transferencia al incluir 2 caídas más de agua como se observa en la figura 2.4 en la imagen de la izquierda.
- Con el objetivo de aumentar la superficie de contacto se plantea incorporar un conjunto de hilos por los que discurren pequeñas cascadas sobre dichos hilos, como se puede comprobar en la imagen de la derecha de la figura 2.4.

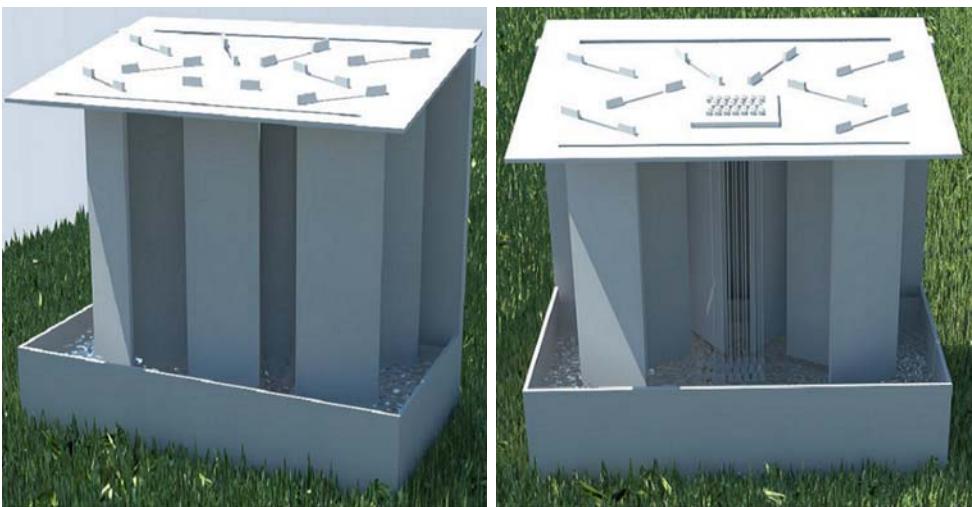


Figura 2.4: Evolución del disipador de calor inicial añadiendo un pilar central en la imagen de la izquierda y añadiendo un set de hilos en la imagen de la derecha.

Para conocer que opción de estudio es más interesante se realiza una comparativa en un simulador virtual de túnel de viento con cada una de las modificaciones.

Se escoge como referencia el coeficiente de arrastre del diseño inicial C_D de 1.25 como se puede comprobar en la figura 2.5.

- Al incluir un pilar central según la imagen izquierda de la figura 2.4 la variable C_D toma el valor de 2.56.
- En la imagen derecha de dicha figura 2.4 el programa aproxima el set de hilos por un bloque grueso con un C_D de 2.77. Esta hecho anula esta opción como posible, ya que el programa no realiza el cálculo en el rango de precisión que nos permitiría considerarla válida ya que el resultado esperado sería una perdida de carga parecida a la del modelo inicial.

A partir del desarrollo de los modelos con este programa también se extrae una posible mejora respecto al ángulo de uno de los pilares para aumentar el coeficiente de arrastre y el tiempo de residencia del aire en el interior del espacio de las cascadas.

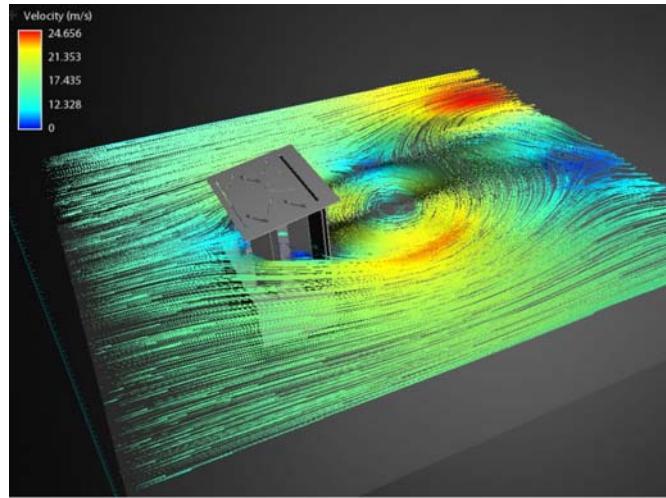


Figura 2.5: Modelo inicial sometido al programa de *Autodesk Flow Design* en este caso el C_D es de 1.25.

Como se observa en la figura 2.6 se ha cambiado el ángulo de los pilares posteriores incrementando el coeficiente de arrastre de 2.56 a 2.83 . Hay que considerar que el cambio ha sido orientativo y se deja para estudios posteriores el análisis óptimo de su valor. La comparativa se ha realizado siguiendo las recomendaciones del manual de usuario del programa, explicadas en el anexo C.

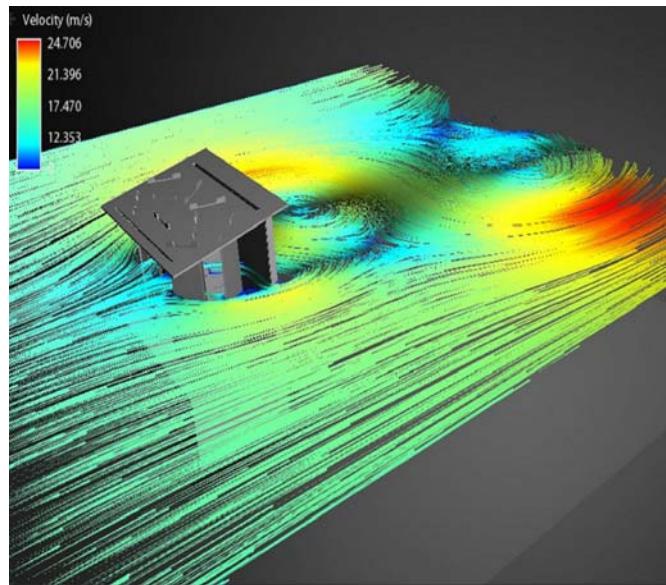


Figura 2.6: Modelo final sometido al programa de *Autodesk Flow Design* en este caso el C_D es de 2,83.

2.4. Solución propuesta

Tomando como base las pruebas de cálculo realizadas se determina la configuración exterior del disipador. La estructura interior realizada íntegramente con piezas de catálogo, se realiza decidiendo entre las opciones que se plantean en el compromiso siguiente:

- La localización de los radiadores en la parte de arriba, junto a la turbulencia de las caídas de agua, mejoraría la transferencia de calor debida a la turbulencia sin embargo, significaría la perdida de potencial de transferencia por el salto térmico ya que el fluido de mayor temperatura estará en la parte superior de la cuba y el de menor en la inferior.
- Posicionando los radiadores en la parte de abajo de la estructura sumergida se despreciaría la turbulencia producida por las caídas de agua. Se decide a priori esta opción dado que el estudio de la vorticidad correspondiente a esas caídas de agua no está incluido en los objetivos de este proyecto. A pesar de este aspecto al optar por esta opción, se dispone de todo el diferencial térmico posible, siendo este parámetro clave en los fenómenos de trasferencia de calor que participan en esa situación, facilitando una mejor disipación térmica.

Con esta decisión, la circulación del fluido refrigerante es la descrita por las flechas color rojo de la figura 2.7. Como se puede observar, el fluido refrigerante atraviesa el sistema de radiadores, cae al depósito inferior y es bombeado través de la pared, para descender por el techo y los pilares que sustentarán las cascadas. Considerando que se ha optado por el diseño de pilar central se dispondrá de 18 cascadas. Se tiene en cuenta un pequeño estanque, con el depósito enterrado, o realizar la instalación sobre el suelo ya pavimentado. Si se optase por esta segunda posibilidad se deberá tener en cuenta el hecho de que el estanque prefabricado y el deposito externo estarán separados, lo que aumentaría el gasto energético debido al bombeo de circulación del fluido.

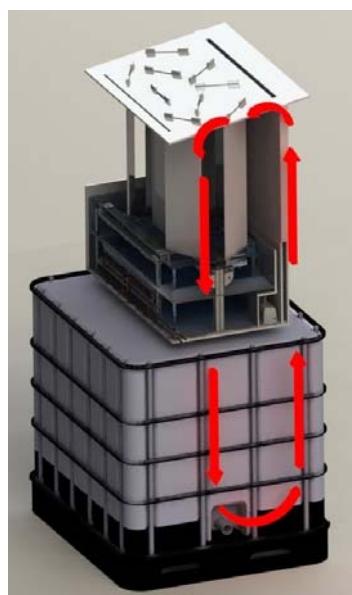


Figura 2.7: Circulación del fluido refrigerante en el disipador.

2.4.1. Arquitectura del dispositivo

El diseño final elegido para realizar el estudio en profundidad en este proyecto es el mostrado en las figura 2.8 en la que se puede observar la selección final del disipador, su estructura interior, y una figura en detalle de ésta.



Figura 2.8: Vista global del disipador y vista en detalle del interior del dispositivo.

3. Simulaciones numéricas

En este capítulo se describen de forma clara y detallada los razonamientos y el procedimiento de análisis numérico, además de las implicaciones que supone la variedad de herramientas y métodos utilizados.

3.1. Cálculos térmicos orientativos

Las herramientas utilizadas para realizar los cálculos térmicos son las siguientes:

- Elaboración de una hoja de cálculo para la geometría decidida, en la que matemáticamente se simulará el efecto de la refrigeración evaporativa y la incidencia solar en el dispositivo.
- Para simular un estanque de base cuadrada estratificado con un intercambiador sumergido se utiliza el programa de cálculo *Trnsys* desarrollado por el Laboratorio de Energía Solar de la Universidad de Wisconsin-Madison y la contribución de la empresa *Thermal Energy Systems Specialists (T.E.S.S)*. Si se desea conocer el estudio en profundidad de este apartado se recomienda consultar el *anexo A*.

3.1.1. Cálculo de la refrigeración evaporativa

Para describir la refrigeración evaporativa se toma la ecuación de Merkel, característica en estos procesos evaporativos, mediante su integral iterativa presentada a continuación:

$$\frac{KaV}{L} = \int_{t_{sal}}^{t_{ent}} \frac{c_p \, dt}{h_{sat} - h}$$

$$Me = \frac{KaV}{L}$$

K: Coeficiente de transporte de masa en $\frac{kg}{s*m^2}$.

a: Área de relleno por unidad de volumen en m^{-1} .

V: Volumen del relleno en m^3 .

L: Caudal de agua líquida $\frac{kg}{s}$.

t_{ent}, *t_{sal}*: Temperatura de entrada y salida del agua en la torre de refrigeración en °C.

c_p: Calor específico del agua líquida en $\frac{J}{kg*K}$.

h_{sat}: Entalpía específica del aire saturado en $\frac{J}{kg}$.

h: Entalpía específica del aire en $\frac{J}{kg}$.

Me: Número de Merkel. Número adimensional que caracteriza el relleno de una torre de refrigeración.

La resolución de forma iterativa de dicha integral se explica de forma específica en el recurso bibliográfico [3]. La curva descrita se cruza con la experimental proporcionada por el fabricante. De esta manera, se verifica el punto de cruce de los valores de los caudales de aire y agua seleccionados. A partir de la aplicación de los caudales verificados en la curva iterativa, se conocen los estados finales de ambos fluidos y en consecuencia sus propiedades.

Con los datos de temperatura de los fluidos y conociendo las constantes correspondientes a la emisividad (ϵ) y absorbitividad (α) del agua, se realiza el cálculo del balance radiativo en la superficie húmeda libre del prototipo (ver tabla 3.1). No se consideran las superficies de las cascadas ya que la incidencia solar es mínima debido al techo del diseño.

Disipación cascadas $\Delta T = 1$	8778 W
Emisión por radiación $\epsilon = 0,98$	208 W
Incidencia solar media $\alpha = 0,5$	205 W
Valor de disipación tomado en el proyecto	800 W

Tabla 3.1: Tabla de balance radiativo en el volumen fluido del prototipo.

3.1.2. Simulación térmica en Trnsys

Con la herramienta informática *Trnsys* se efectúa la simulación térmica del prototipo. Este programa trabaja con módulos de cálculo integrados llamados «types». Es el usuario quién decide qué variables serán las entradas y salidas de cada módulo, así como cuáles de dichas variables serán las intervinientes entre módulos. En el cálculo planteado se usarán los siguientes «types»:

- **Type 9:** Bloque utilizado para la lectura de los ficheros de condiciones ambientales y de parámetros de configuración definidos por el usuario.
- **Type 65c:** Permite la visualización de resultados y la exportación de los mismos en un documento ASCII.
- **Type 531:** Núcleo de la simulación, perteneciente a la librería de la universidad de Wisconsin. Corresponde a un estanque de base cuadrada estratificado con un intercambiador de calor sumergido.

La configuración de este «type» es clave en el planteamiento del problema. Alcanzar la configuración apropiada del módulo 531 es el proceso que más tiempo ha durado del asignado a este cálculo.

En la configuración del bloque de cálculo número 531 se deben especificar correctamente las siguientes condiciones:

- **Condiciones geométricas:** Debe describir matemáticamente el mismo perímetro, altura y volumen que el diseñado.
- **Condiciones de contorno:** El nodo inicial de la discretización del volumen del estanque debe estar en contacto con la temperatura ambiente. La variable «temperatura ambiente» será una variable entre módulos, concretamente de salida en el «type 9» y de entrada en el «type 531».

- **Condiciones inherentes al propio fluido:** El fluido que interviene en el cálculo es agua (tanto en el del volumen del estanque como en el que fluye a través del intercambiador). Las propiedades de este fluido utilizadas para el cálculo se obtendrán de la biblioteca de propiedades de fluidos del programa *Trnsys*.
- **Condiciones del Intercambiador:** Se debe especificar que el intercambiador elegido es de tipo serpentín, con las características geométricas definidas, de cobre y cuya posición será la misma que nodo final de cálculo.

El principal inconveniente del uso de este bloque de cálculo es la geometría de los intercambiadores. La biblioteca de modelos no incluye la posibilidad de aleatorizar la superficie del serpentín. Sin embargo, aunque el programa permite reprogramar el código del módulo en lenguaje *Fortran*, no se ha contemplado esa posibilidad por estar fuera de los objetivos del proyecto.

De esta manera, los resultados de esta simulación se tomarán únicamente como orientativos.

Si se desea profundizar tanto en la configuración del «type 531» como en el uso de *Trnsys* en este proyecto se recomienda consultar el anexo A.

3.2. Obtención del modelo CAD

Este apartado, explicado en profundidad en el anexo B, responde a la necesidad de crear una geometría para realizar los cálculos que se plantean. El programa de dibujo 3D utilizado para el ensamblado del conjunto y el diseño de las piezas particulares necesarias es *Solidworks*.

Para reducir la carga de trabajo respecto al diseño se ha utilizado el catálogo comercial *Hilti Profis* obtenido en la referencia bibliográfica 4, dicho programa permite la descarga de las piezas necesarias en formato digital para realizar el ensamblaje de la estructura interna. Con este proceso se obtiene la geometría que permite que los siguientes aspectos se puedan llevar a cabo:

- Cálculo del efecto del viento sobre la geometría.
- Cálculo de los movimientos del fluido y de la transferencia de calor en el interior del diseño.
- Visualización virtual del prototipo integrado en una vivienda.

Para realizar los cálculos este modelo deberá tener una calidad descrita como completamente cerrado, «solid» o «watertight»

3.3. Mecánica de fluidos computacional

En este apartado se describen las diferentes simulaciones calculadas bajo las técnicas CFD descritas en la página 10. Se puede subdividir este apartado en función del fluido estudiado: gaseoso o líquido.

3.3.1. Fluido gaseoso

Para poder realizar simulaciones con el fluido gaseoso se precisa primero de un dominio de cálculo correspondiente al volumen de gas, y situar en su interior un modelo CAD descrito en el apartado 3.2. Se calcularán las variaciones de presión y velocidad en el dominio por sumergir el modelo en dicho fluido.

El uso del CFD se precisa por primera vez en el proyecto para descartar y desarrollar diferentes geometrías mediante el programa *Autodesk Flow Design*. Este programa es un simulador de un túnel de viento, que desarrolla el cálculo del flujo del fluido estudiado, tomando como base una orientación y velocidad del viento establecidas previamente.

El objetivo de la utilización de este programa es definir la mejor opción entre las planteadas a priori y dada su sencillez de manejo, realizar las comparativas entre las diferentes mejoras, para concretar un diseño final. Se ha realizado una guía de usuario aplicada al proyecto del programa *Autodesk Flow Design*, en la que se describe el proceso seguido, así como las herramientas de dicho programa. Si al lector le interesa consultarla puede encontrarla en el anexo C.

Una vez decidido el modelo final, para obtener un cálculo detallado del volumen gaseoso y del efecto de sumergir en el mismo el modelo final, se utiliza un programa de licencia libre o «software libre» llamado *OpenFOAM* (ver referencia 5).

Este programa requiere unos conocimientos sobre su estructura y funcionamiento, ya que se deben crear unos ficheros y ordenarlos de una manera determinada, como se muestra en la figura 3.1. Al ejecutar una aplicación o solver el *OpenFOAM* acudirá a esta estructura y se podría producir un error si el orden de dicha estructura no fuese el preciso.

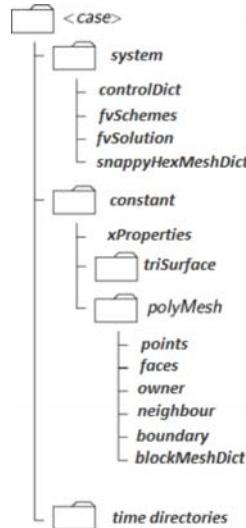


Figura 3.1: Estructura de archivos de un caso básico para ejecutar en OpenFOAM

El proceso de cálculo finaliza cuando se alcanza un nivel de precisión mayor al fijado en la configuración o transcurrido el número máximo de iteraciones permitido. Asimismo, el fin de este proceso supone la creación de un directorio de tiempo con los valores de las variables calculadas en cada uno de los nodos de la malla. También se crea un archivo con los valores que toman los coeficientes aerodinámicos en cada una de las iteraciones realizadas, información que se utiliza para estudiar la convergencia del proceso de cálculo.

En el *anexo D* se describe en detalle el trabajo que se ha realizado con este programa.

Para realizar el cálculo se ha utilizado la herramienta *snappyHexMesh* explicada en el recurso bibliográfico [6].

Con el objetivo de comprobar la precisión del cálculo se han realizado los mismos cálculos en las mismas condiciones iniciales, excepto los parámetros de refinamiento de malla mostrados en la tabla 3.2. Se puede observar en dicha tabla la estabilidad de los resultados, representada por la poca variación de C_D . En la imagen 3.2 se observa la malla y su refinamiento para la primera configuración de la tabla.

blockMeshDict	snappyHexMeshDict	C_D	Tiempo
blocks.hex	refinementSurfaces		
20 12 8	5 6	0.0183182	5m05
20 12 8	6 7	0.0182616	6m54
40 24 16	5 6	0.0182246	50m6

Tabla 3.2: Tabla de resultados al refinar la malla en OpenFOAM.

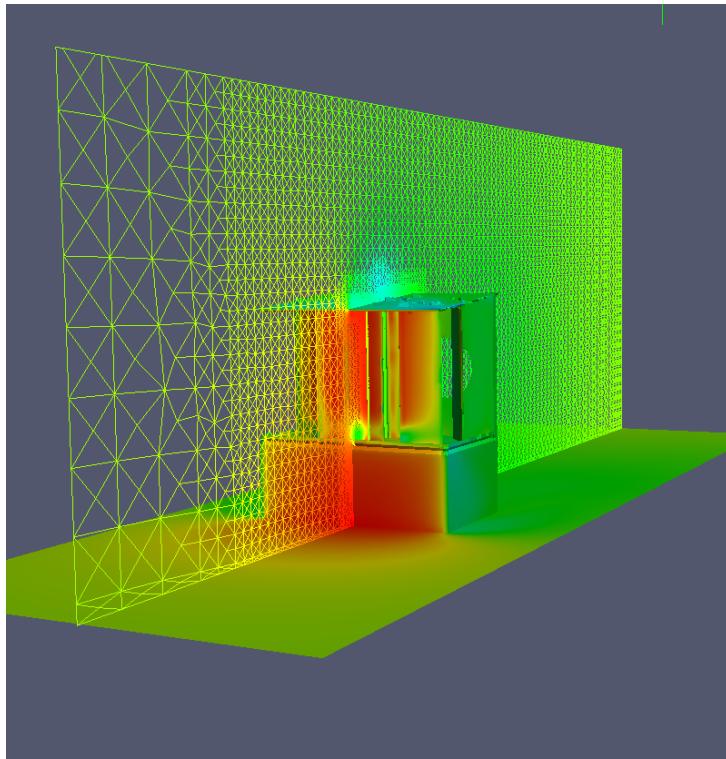


Figura 3.2: Imagen de un corte de la malla 3D en OpenFOAM

3.3.2. Fluido líquido

Para conocer con detalle el movimiento del fluido y las temperaturas alcanzadas en los volúmenes de cálculo, se plantea un análisis CFD a los diferentes volúmenes fluidos: al volumen fluido del estanque y al volumen fluido que circulará por el interior del intercambiador.

El problema planteado será descrito como una transferencia conjugada de calor (fluido-sólido-fluido).

- El primer intercambio de calor transcurre en el interior del disipador sumergido. La fuente de energía será el fluido de entrada a dicho disipador, que en la circulación a través del mismo el fluido primario le cede parte de su la energía térmica. Ese incremento de energía aumentará la temperatura del intercambiador, que actuará de «sólido» en el esquema de transferencia conjugada de calor.
- El segundo intercambio de calor del esquema, toma como emisor de energía la superficie del «sólido» y es allí donde debido a la diferencia de temperatura con el fluido en el que esta inmerso se disipa esa temperatura superficial, transfiriendo la energía térmica del intercambiador al fluido secundario cerrando el proceso de disipación primario.

La cesión de energía residual del volumen del fluido dentro del prototipo (fluido secundario) al ambiente se realiza en las cascadas. Esta disipación de potencia calculada en el apartado 3.1 influirá como condición de contorno. Para asegurar un correcto funcionamiento se toma capacidad de la disipación en este punto aproximadamente diez veces inferior a la calculada. Así el valor de esta potencia será de 800 W.

De esta forma, garantizando el funcionamiento en esta potencia disipativa se consigue un mejor funcionamiento para el valor de diseño.

Para realizar el análisis mediante técnicas CFD de los diferentes fluidos del modelo final y conocer en detalle la resolución del problema de transferencia conjugada de calor que se plantea, se utiliza la herramienta *Autodesk Simulation CFD 2014*.

Este entorno de cálculo es una herramienta comercial adaptada a multitud de formatos CAD comerciales. Dispone de una amplia librería de materiales y fluidos con sus propiedades predefinidas. Una gran versatilidad de cálculo y la sencillez de uso junto a las facilidades anteriores son los motivos por los que se eligió esta herramienta enfocada a la simulación de este tipo de transferencia de calor.

El método de trabajo que hay que seguir para poder ejecutar el cálculo sin errores en el entorno seleccionado se describe paso a paso de forma resumida a continuación:

- **Definición de la geometría.** Es necesario definir una geometría y sus límites en un formato CAD, como se describe en el apartado 3.2.
- **Adaptación del modelo al entorno.** Al generar el caso de estudio, el entorno solicita una geometría CAD para importarla y conformar los diferentes volúmenes.

- **Especificación de los materiales sólidos y fluidos.** Una vez adaptada la geometría al entorno de cálculo, para poder calcular es necesario especificar los materiales de todos los objetos identificados, ya que por defecto ninguno viene especificado.

- **Condiciones de contorno.** Las condiciones de contorno son los valores asignados a objetos o superficies en el modelo que tienen influencia en algún material fluido o en el valor de alguna transferencia de calor.

Todas las entradas y salidas que permiten a los fluidos fluir dentro y fuera del modelo deberán ser asignadas. De la misma manera, todos los flujos de energía interviniéntes en la transferencia de calor deberán ser definidos. La selección de áreas y de valores como condiciones de contorno en el caso presente se muestran en la tabla 3.3.

Intercambiador			
Superficie	Temperatura	Caudal	Sentido de la Normal
Entrada	72°C / 32°C	1.6 $\frac{m^3}{h}$ / 3.7 $\frac{m^3}{h}$	Dentro del volumen
Salida	Presión Manométrica		

Volumen de Fluido			
Superficie	Condiciones Singulares	Caudal	Sentido de la Normal
Superficie Superior	Potencia Total -800 W	Entrada 2.1 $\frac{kg}{s}$	Dentro del volumen
Superficie Inferior	Presión Manométrica	Salida 2.1 $\frac{kg}{s}$	Fuera del volumen

Tabla 3.3: Tabla de condiciones de contorno a imponer en el *Autodesk Simulation CFD 2014*

- **Condiciones transitorias.** En este caso se fija la temperatura inicial del volumen fluido en 22°C de forma arbitraria.
- **Mallado.** Una vez definidos todos los elementos y sus propiedades térmicas y dinámicas, el paso siguiente es el mallado. La malla esta directamente relacionada con la geometría y el modelo, por este motivo una geometría limpia es tan importante. En el entorno *Autodesk Simulation CFD 2014* el mallado es muy sencillo. Ya que si se han seguido los pasos anteriores, no debería existir ningún problema con el mallado automático.
- **Cálculo.** La orden para desarrollar el calculo es *solve*. Los modos de cálculos permitidos son estacionario (*steady state*) y transitorio (*transient*), tanto para flujo (*flow*), como para transferencia de calor (*heat transfer*). El entorno permite un cálculo simultáneo de las ecuaciones transitorias de flujo y de transferencia de calor, pero no lo recomienda. Ya que los cálculos en el modo transitorio son más complejos y requieren de más iteraciones. En el proyecto se han utilizado los siguientes parámetros especificados en la tabla 3.4.
- **Postprocesado de resultados.** Poder ver los resultados de una forma concreta y apropiada es tan importante como el cálculo. Hay muchas opciones para visualizar estos resultados, las mas comunes son: planos (*planes*), trazas (*traces*) e isosuperficies (*isosurfaces*).

Modo Estacionario	500 iteraciones o precisión de 10^{-3} <i>degrado</i>
	Paso de 5 seg
Modo Transitorio	tiempo de cálculo de 7200 paso (10 horas)
	Alcanzar Estacionario

Tabla 3.4: Tabla de parámetros para la orden *solve* de *Autodesk Simulation CFD 2014*

Si se desea conocer en detalle cada uno o alguno de los aspectos anteriores se recomienda consultar el anexo E. En este anexo se exponen las directrices que se siguen en el entorno *Autodesk Simulation CFD 2014* para conseguir la resolución de las simulaciones planteadas, su representación y la visualización de los resultados.

4. Resultados finales

En este capítulo se detallan los resultados procedentes de los diferentes cálculos realizados. El orden de los resultados y sus conclusiones describen el trabajo realizado en el proyecto concluyendo en un diseño que responde satisfactoriamente a todos los interrogantes planteados a lo largo del cálculo.

4.1. Cálculos térmicos orientativos

El primer paso en la confección del proyecto es conocer datos concretos del diseño. Para ello se toma como herramienta la hoja de cálculo del programa *Microsoft Excel* en la que se efectúan los cálculos pertinentes para conocer los caudales idóneos en la situación planteada. En la siguiente gráfica (4.1) se plasma la curva experimental proporcionada por el fabricante y la curva fruto de la integración de Merkel.

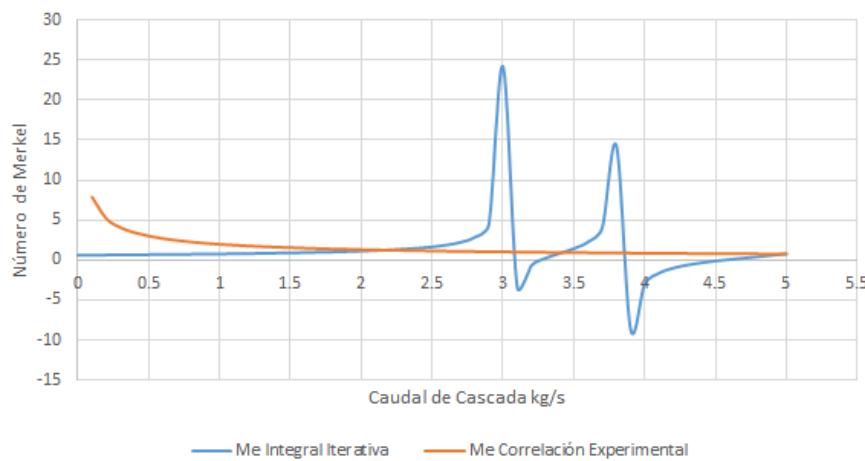


Figura 4.1: Gráficas de representación para los números de Merkel

En la figura 4.1 se puede observar el punto de cruce entre ambas curvas. Este punto adquiere un valor de 2.15 kg/s y representa el caudal de las cascadas para las condiciones ambientales resultantes de la media de los datos climáticos (Temperatura ambiente media de $22.24^\circ\text{C} \approx 23^\circ\text{C}$ y humedad relativa del $56.13\% \approx 56\%$). El caudal calculado impone de forma indirecta el estado del aire a la salida de la torre de refrigeración (ver tabla 4.1).

4. Resultados finales

4.1 Cálculos térmicos orientativos

	Temperatura	Humedad relativa
Entrada	$22.24^{\circ}\text{C} \approx 23^{\circ}\text{C}$	$56.13\% \approx 56\%$
Salida	20°C	70%
Δ	2.24°C	13.87%

Tabla 4.1: Tabla de datos de entrada y salida de la torre de refrigeración utilizados en la hoja de *Microsoft Excel*.

Conocidas propiedades de los fluidos en la cascada, se calcula mediante *Trnsys* el funcionamiento del intercambiador sumergido en un depósito de base cuadrada. Considerando los resultados anteriores y los datos climáticos se obtienen las siguientes representaciones de la Figura 4.2.

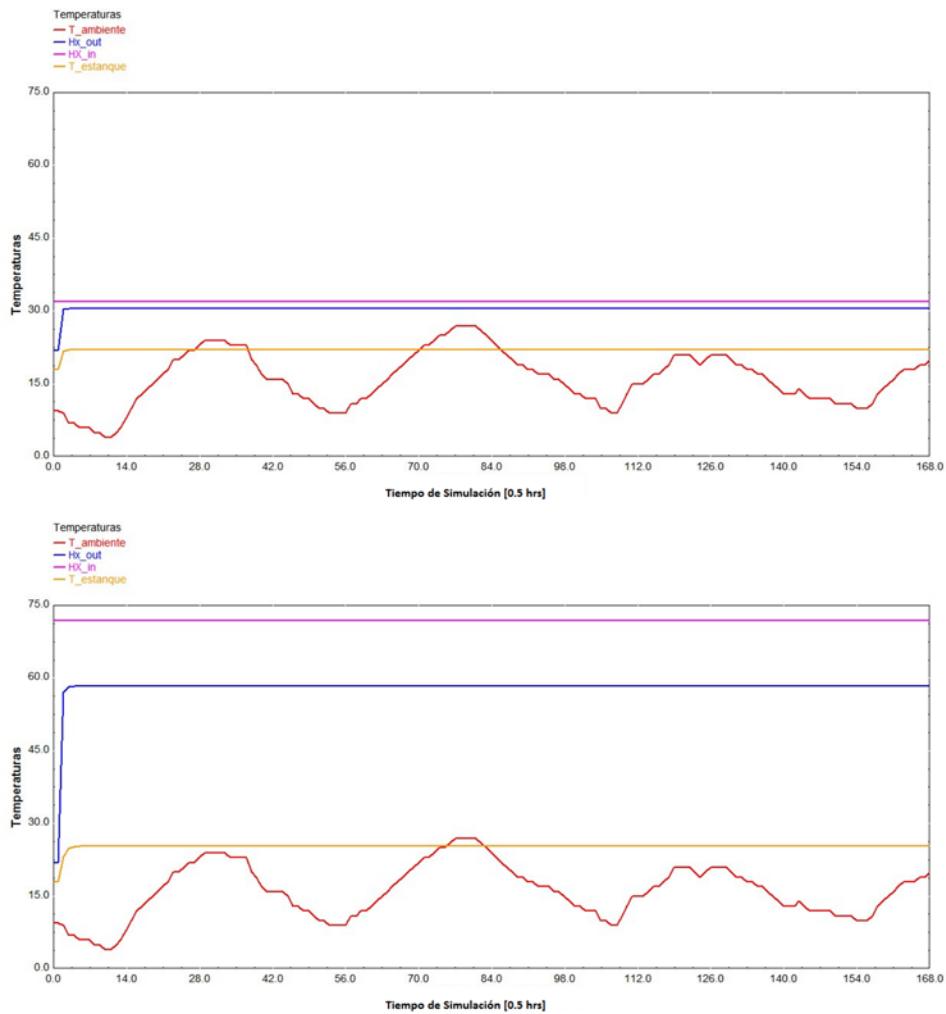


Figura 4.2: Resultados del cálculo en *Trnsys*.

En la tabla 4.2 y en la figura 4.2 se observa que el serpentín sumergido no cubre las especificaciones necesarias. Se plantea la posibilidad de aletear la superficie del intercambiador y realizar un planteamiento diferente para la resolución del problema. Una conclusión positiva que se puede extraer del resultado es la gran estabilidad del sistema. Si se desea conocer más información se recomienda acudir al apartado 3.1 y/o al anexo A correspondiente con la temática aquí tratada.

Temperatura Fluido Primario del Intercambiador		
Modo de funcionamiento	Normal	Disipación
Entrada	32 °C	72 °C
Salida	27 °C	65 °C
Resultado de Trnsys	30.92 °C	58.6 °C

Tabla 4.2: Tabla de resultados del cálculo en *Trnsys*.

4.2. CFD: Fluido gaseoso

La necesidad de conocer de forma rápida el coeficiente de arrastre del diseño inicial conduce al uso de *Autodesk Flow Design*. Los resultados de la simulación inicial se observan en la imagen [\[2.5\]](#) comentada anteriormente.

Por recomendación de la guía de usuario el proceso de cálculo más estable se alcanza a una velocidad de 10 m/s por lo que se efectúan todas las simulaciones para la comparativa a esa velocidad.

Las mejoras planteadas son la de un pilar central y la de un conjunto de hilos como se observa en la figura [\[4.3\]](#) con unos C_D de 2,56 y 2,77 respectivamente para el pilar central y el conjunto de hilos.

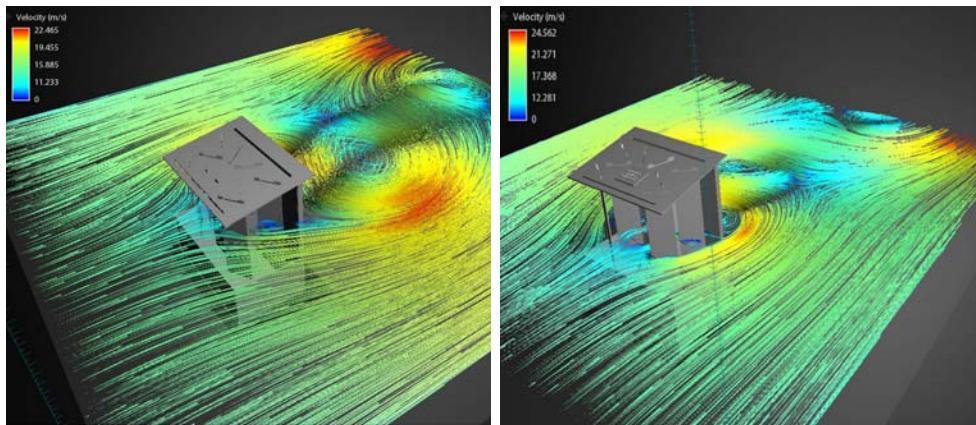


Figura 4.3: Resultados de la comparativa en *Autodesk Flow Design*

En el apartado [\[2.3.2\]](#) se exponen los motivos por los que la opción de los hilos queda descartada y se continua el proyecto con la alternativa del pilar central. Tras simular el modelo con dicha mejora, se observa que se obtendría un aumento del coeficiente C_D si se cambia la orientación de los pilares posteriores, por lo que se decide cambiarlos en consecuencia. Con esta última mejora se alcanza un C_D de 2,83 (esta simulación se ha comentado previamente junto a la figura [\[2.6\]](#)). Una vez decidido el modelo final, se efectúa una simulación en detalle del flujo del fluido.

Para ello se utiliza el programa *OpenFOAM* comentado en el apartado 3.3.1. La velocidad media del viento (2.27 m/s) es la principal condición de contorno en este cálculo en detalle. Los resultados se plasman en la figura siguiente (4.4); la presión está representada en la superficie del objeto y la velocidad en las líneas de corriente y sobre la malla.

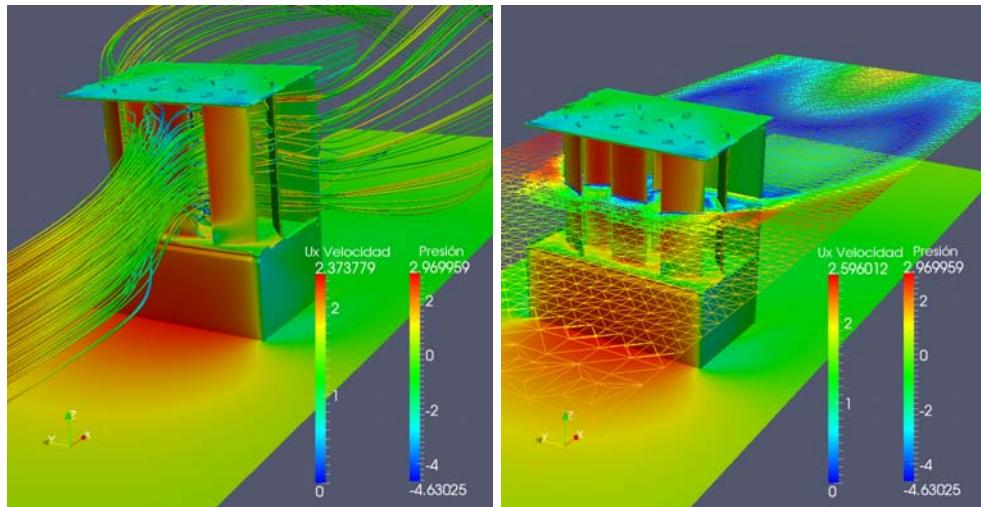


Figura 4.4: Resultados del cálculo en *OpenFOAM*

La premisa bajo la que se realizan los cálculos es la existencia de viento. La posibilidad de la ausencia de este conduce a dos corrientes de desarrollo:

- Realizar un control de caudal variable con el viento y la temperatura ambiente para así optimizar la capacidad disipativa de las cascadas.
- Garantizar la existencia de una corriente de aire que atravesese el dispositivo.

Esta última línea de desarrollo queda solucionada con la posibilidad de incluir en el diseño dos ventiladores, respetando la simetría y garantizando el caudal y la velocidad del flujo de aire pero sin generar un excesivo ruido que sea un inconveniente para un lugar habitado. El tamaño de ventilador elegido es de 305 mm (10") de diámetro, con la posibilidad de establecer su punto de funcionamiento a muy bajas revoluciones, para no alcanzar niveles altos de ruido.

Se ha realizado el mismo cálculo modificando el modelo y se observa que el cambio en el diseño apenas influye en la dinámica del aire. También se ha planteado el cálculo en ausencia de viento conociendo así:

- El alcance de los ventiladores. Como resultado de la simulación se concluye que será aproximadamente de 5 m de espacio libre.
- La distribución de velocidades en ese espacio.

Se pueden observar estos resultados en la figura 4.5.

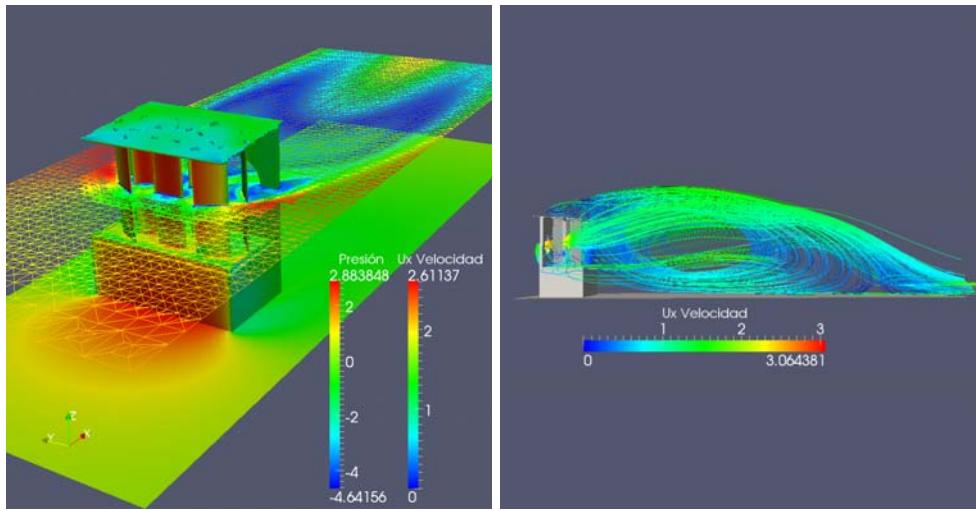


Figura 4.5: Resultados del cálculo en *OpenFOAM* del modelo con ventilador

Los resultados obtenidos apoyan las modificaciones aplicadas. Si se desea profundizar en alguno de los cálculos se invita a consultar el apartado 3.3.1 y el anexo D.

4.3. CFD: Fluido líquido

Para confirmar y concluir de una forma más detallada y completa las observaciones del apartado 4.1 se plantea el estudio CFD del problema de transmisión conjugada de calor. La herramienta utilizada para realizar estas simulaciones es *Autodesk Simulation CFD 2014* y las consideraciones planteadas a continuación buscan cubrir las necesidades técnicas de la función primaria (ver tabla 4.2).

Como se observa en la tabla 4.3 se cumplen los objetivos planteados. Se destaca que todos los resultados de «Salida» resultantes del cálculo cumplen los requisitos de disipación primaria. Además el fluido secundario no alcanza temperaturas problemáticas respecto a aspectos bacteriológicos comentados previamente.

Temperatura Fluido Primario			Temperatura Fluido Secundario	
Modo de funcionamiento	Normal	Disipación	Normal	Disipación
Nec.Téc.: Entrada	32 °C	72 °C	22 °C	22 °C
Nec.Téc.: Salida	27 °C	65 °C	- °C	- °C
Salida Conv.Forzada	23.6 °C	26.8 °C	22.8 °C	25.4 °C
Salida Conv.Natural	22.8 °C	22.7 °C	22 °C	22 °C

Tabla 4.3: Tabla de resultados de la simulación en *Autodesk Simulation CFD 2014*.

Cada figura representa la simulación con convección forzada y con convección natural, a izquierda y derecha respectivamente. En las figuras 4.6 y 4.7 se observa el modelo completo, del que por cuestiones de interés para facilitar el cálculo se ha excluido la estructura interna considerando únicamente la placa divisoria que obliga al paso del flujo a través de los intercambiadores.

Se observan los resultados de la simulación de la transferencia conjugada de calor en las imágenes. La temperatura del fluido primario y del sólido es la misma, sin embargo, la temperatura del volumen de fluido disipante se muestra en un tono translúcido en su estado estacionario en la misma escala que el primario para poder realizar una comparación visual sencilla.

En el plano de corte se representa vectorialmente la circulación del fluido en la que se observa como fluye a través de los intercambiadores gracias a la placa intermedia. Las diferencia principal, además del modo convectivo, es el tiempo de convergencia al estado estacionario como se puede observar en la tabla 4.4.

Modo de funcionamiento	Convección Forzada	Convección Natural
Normal. Tiempo de convergencia	730 seg.	840 seg.
Disipación. Tiempo de convergencia	280 seg.	385 seg.

Tabla 4.4: Tabla de tiempos de convergencia de la simulaciones en *Autodesk Simulation CFD 2014*.

El criterio de convergencia se ha marcado para el fluido primario. Como se puede observar todavía no se ha alcanzado el equilibrio en el fluido secundario para las simulaciones con convección natural en el momento de finalizar la simulación. El hecho de que la difusión de temperatura en la convección natural sea más lenta en alcanzar el equilibrio que la convección forzada y en consecuencia en bajar la temperatura del sistema primario conduce a recomendar para garantizar el correcto funcionamiento de la máquina de adsorción el uso de la circulación forzada para ambas situaciones de funcionamiento.

El estudio se explica con mayor detalle en el apartado 3.3.2 así como anexo E.

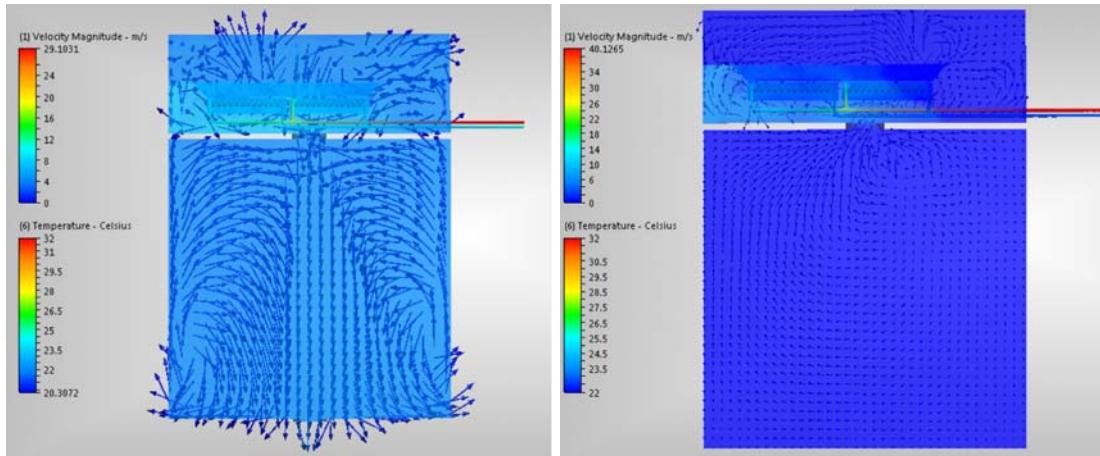


Figura 4.6: Resultados del cálculo en *Autodesk Simulation CFD 2014* del funcionamiento normal para circulación forzada y natural del fluido secundario

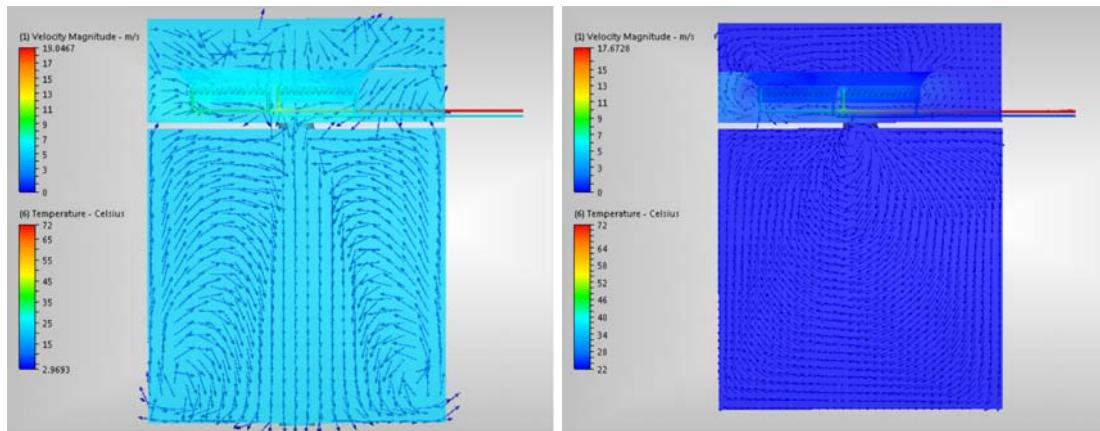


Figura 4.7: Resultados del cálculo en *Autodesk Simulation CFD 2014* del funcionamiento en disipación para circulación forzada y natural del fluido secundario

5. Conclusiones Generales

En este último capítulo es imprescindible realizar una valoración del grado de cumplimiento de los objetivos iniciales del proyecto, así como unas líneas de trabajo futuro y las consideraciones finales del trabajo realizado.

5.1. Líneas futuras

La evolución del prototipo hasta el producto final, así como el desarrollo de las técnicas utilizadas en el diseño del prototipo son dos factores que no se encuentran contemplados en este proyecto y que podrían ser objeto de progreso en un futuro.

- Las posibles mejoras con respecto al producto podrían basarse en el desarrollo de la forma «cuantitativa» del prototipo para alcanzar una geometría detallada a nivel de fabricación y así realizar una comprobación experimental de los modelos matemáticos empleados para su diseño. Otra posible mejora podría consistir en determinar el sistema eléctrico y de control automático que no han sido contemplados en el proyecto. Por último, conseguir la optimización del depósito sería otra posible mejora para alcanzar una potencia apropiada de disipación y así poder establecer un catálogo según la capacidad disipativa. De esta manera se dispondría de un prototipo finalizado. Para transformarlo en un producto comercial se debería confeccionar un kit de montaje que incluyese las instrucciones y el material necesario para la instalación del mismo.
- El desarrollo del proyecto se ha visto afectado por las técnicas utilizadas en el diseño y el cálculo del mismo. La ausencia de un modelo matemático de CFD de difusión de agua en aire y/o psicrometría, así como la dificultad para simular la turbulencia y la inclusión de burbujas de aire en el agua causadas por las cascadas, provocó que el cálculo de dichas cascadas no se llevase a cabo mediante estas técnicas. Esta circunstancia motivó que no fue posible la simulación de las mismas ni conocer la influencia de la turbulencia en la trasferencia de calor.

El desarrollo de las herramientas y las técnicas acordes a estos fenómenos físicos permitirían simular en detalle cualquier situación en la que dichos fenómenos representasen un factor significativo.

Con todo ello, los fundamentos que se modelaría se podrían aplicar a instalaciones de mayor tamaño. Esto permitiría calcular los caudales de las cascadas y/o estanques, y las propiedades de los flujos de agua y aire intervinientes. De esta manera se facilitaría su utilización en proyectos de construcción o rehabilitación de edificios, así como determinar si se desea, el uso de aljibes o piscinas en el caso de desestimar la función secundaria.

5.2. Consideraciones finales

Al finalizar el proyecto, el diseño queda definido de forma «cuantitativa». Se han usado elementos estándar y/o de catálogo que minimizasen el número de piezas a someter a un proceso de fabricación. La facilidad de montaje ha sido un objetivo prioritario que se ha alcanzado mediante la incorporación las piezas de catálogo seleccionadas. La funcionalidad del disipador queda justificada en los aspectos térmicos y energéticos.

El objetivo principal se alcanza convenientemente y el diseño de dicho disipador garantiza el correcto funcionamiento de la máquina de adsorción. Se valida un uso alternativo de la energía residual (utilizada para alcanzar la situación de «confort higrotérmico» en el entorno del dispositivo) y se logra una integración arquitectónica del prototipo en terrazas o espacios comunes como se observa en la figura 5.1, completando de forma el eficaz objetivo secundario y proporcionando una alternativa a las habituales torres de refrigeración.

Con todo ello, se ha logrado alcanzar los objetivos planteados al inicio del proyecto de manera satisfactoria.



Figura 5.1: Imágenes virtuales de la integración arquitectónica del proyecto.

Bibliografía

- [1] Gobierno de Aragón Oficina del regante. oficinaregante.aragon.es/.
- [2] Agencia Estatal de Meteorología. <http://www.aemet.es/>.
- [3] L. J.M^a Marin, CH. Olivan y E. Sanroman. *Diseño de torres de refrigeración a contracorriente*. 1993.
- [4] Hilti Profis. <https://www.us.hilti.com/bim>.
- [5] The OpenFOAM Foundation. www.openfoam.org/docs/user/.
- [6] The OpenFOAM Wiki. <http://openfoamwiki.net/index.php/snappyhexmesh>.
- [7] J.M^a Marin y C. Monne. *Transferencia de calor*. Kronos, 1997.
- [8] Refrigerating American Society of Heating and Air-Conditioning. *ASHRAE Handbook*. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning, 2010.
- [9] D.W. Green y J.O. Malone y R.H. Perry. *Manual del ingeniero químico*. McGraw-Hill, 2001.
- [10] J.M. White. *Mecánica de fluidos*. McGraw-Hill, 2008.
- [11] J.H. Ferziger y P. Milovan. *Computational methods for fluid dynamics*. Springer, 2002.
- [12] Paraview Open Source Scientific Visualization. <http://www.paraview.org>.
- [13] University of Wisconsin Madison Trnsys. <http://sel.me.wisc.edu/trnsys/index.html>.
- [14] University of Wisconsin Madison Lista de correo de dudas sobre TRNSYS en el Solar Energy Lab. <https://mailman.cae.wisc.edu/listinfo/trnsys-users>.
- [15] P. Moonen. Cfd evaluation of wind tunnel flow quality. Technical report, Eindhoven University of Technology, 2006.

