

# Proyecto Fin de Máster

## Máster Universitario en Ingeniería Industrial

Estudio de industrialización de un nuevo diseño de chimenea solar para su integración en edificios

Autor: Ignacio Corrales Pérez

Tutor: José Sánchez Ramos

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

Sevilla, 2023





Proyecto Fin de Máster  
Ingeniería Industrial

# **Estudio de industrialización de un nuevo diseño de chimenea solar para su integración en edificios**

Autor:  
Ignacio Corrales Pérez

Tutor:  
José Sánchez Ramos  
Profesor titular

Dpto. de Ingeniería Energética  
Escuela Técnica Superior de Ingeniería  
Universidad de Sevilla  
Sevilla, 2023



# Agradecimientos

---

Agradecer a mi tutor Don José Sánchez Ramos, por su confianza y cercanía, por compartir su conocimiento con ganas y solidaridad. Por hacerme sentir que el camino hasta aquí ha servido, y por hacerme sentir orgulloso de mi pequeño aporte a la sociedad. Y como no podía ser de otra manera, agradecer a Doña Teresa Palomo por haber desarrollado la parte más teórica del trabajo, trabajo del que he aprendido enormemente y que me ha servido de trampolín a la hora de desarrollar este Trabajo de Fin de Máster.

A mis padres, por permitirme ir siempre “a hombros de gigantes”.

A mi hermano, con todo el significado de la palabra.

A Mar, por querer compartir tu vida conmigo.

A todos, **gracias**.

*Ignacio*  
*Sevilla, 2023*





# Resumen

---

La búsqueda de la eficiencia energética está a la orden del día en nuestra sociedad. Una vez la humanidad ha comprendido el peligro que supone el cambio climático y todas sus consecuencias, nos enfrentamos a seguramente el mayor reto del siglo XXI: dejar de depender de los combustibles fósiles.

Para resolver este complejo problema, la mayor parte del esfuerzo y tecnología disponibles se centran actualmente en la búsqueda de energías alternativas que puedan derrocar la supremacía del petróleo y sus derivados, para obtener otras maneras eficientes de producir la tan ansiada energía eléctrica, motor del mundo.

Pero si retrocedemos un poco hacia el origen del problema, podemos llegar a la conclusión de que las energías alternativas no son la única solución (por supuesto son una componente fundamental) para acabar con la hegemonía de los combustibles fósiles, y que quizás solo tengamos que utilizar menos energía, gastar menos... lo que por todos es conocido como "eficiencia energética".

Este pensamiento nos lleva a la búsqueda de técnicas de ahorro energético en sectores de diversa índole. El presente documento tratará de mostrar una solución aplicable al sector de la edificación, aunque bien podría servir como base de aplicación para cualquier otro (con su respectiva dedicación e imaginación); siendo el principal objetivo de este trabajo reducir la demanda energética sin disminuir el confort de las personas.

Para ello se presenta una técnica de ventilación pasiva para el interior del edificio, que consiste en una chimenea solar especialmente diseñada para presentar una gran capacidad de almacenamiento térmico durante el día y servir como sistema de ventilación nocturna, proporcionando así el confort térmico sin necesidad de energía eléctrica.

El documento presenta una primera parte de introducción, que servirá para poner en contexto al lector de las diferentes tecnologías de ventilación pasiva existentes, mostrando algunas soluciones innovadoras y sirviendo como enlace al segundo punto, donde se presentará detalladamente el concepto de chimenea solar, sus tipologías y estado del arte actual.

Es entonces cuando se recurre al estudio de Doña Teresa Palomo Amores, que lleva a cabo el análisis de una solución innovadora de chimenea solar incorporando aletas al interior del sistema de captación, estudio sobre el cual se realiza un trabajo de investigación centrado en el análisis de materiales, dimensiones óptimas y cálculos necesarios para desarrollar un prototipo experimental con el que pueda finalmente demostrarse la eficiencia de la solución, obteniendo con ello un producto totalmente industrializable.

Para ello se realiza una búsqueda exhaustiva de empresas y fabricantes que puedan aportar información técnica y valores de referencia a partir de los cuales realizar un análisis en profundidad, obteniendo así el modelo de chimenea solar óptimo que busca maximizar el rendimiento.

Adicionalmente se presentan planos del modelo, planos de fabricación que faciliten la industrialización final de los primeros prototipos. Con estos prototipos, desarrollados acorde a lo especificado a lo largo del trabajo realizado, se pretende confirmar de manera inconfusa la viabilidad técnica y tecnológica de la solución, con el objetivo final de lanzar al mercado este modelo innovador de chimenea solar.







# Abstract

---

The quest for energy efficiency is the order of the day in our society. Once mankind has understood the dangers of climate change and all its consequences, we are surely facing the greatest challenge of the 21st century: weaning ourselves from our dependence on fossil fuels.

To solve this complex problem, most of the effort and technology available is currently focused on the search for alternative energies that can overthrow the supremacy of oil and its derivatives, to obtain other efficient ways of producing the longed-for electrical energy that drives the world.

But if we go back to the origin of the problem, we can come to the conclusion that alternative energies are not the only solution (of course they are a fundamental component) to end the hegemony of fossil fuels, and that perhaps we just need to use less energy, spend less... what is known by all as "energy efficiency".

This thinking leads us to search for energy saving techniques in various sectors. This document will try to show a solution applicable to the building sector, although it could well serve as a basis for application to any other sector (with its respective dedication and imagination); the main objective of this work being to reduce energy demand without reducing people's comfort.

For this purpose, a passive ventilation technique for the interior of the building is presented, which consists of a solar chimney specially designed to present a high thermal storage capacity during the day and to serve as a night ventilation system, thus providing thermal comfort without the need for electrical energy.

The document presents a first introductory part, which will serve to put the reader in context of the different existing passive ventilation technologies, showing some innovative solutions and serving as a link to the second point, where the concept of solar chimney, its typologies and current state of the art will be presented in detail.

Is in this moment when we turn to the study by Teresa Palomo Amores, who analyses an innovative solar chimney solution incorporating fins inside the collection system, a study on which research work is carried out focusing on the analysis of materials, optimum dimensions and calculations necessary to develop an experimental prototype with which the efficiency of the solution can finally be demonstrated, thereby obtaining a fully industrialisable product.

To this end, an exhaustive search is carried out for companies and manufacturers that can provide technical information and reference values from which to carry out an in-depth analysis, thus obtaining the optimal solar chimney model that seeks to maximise performance.

In addition, plans of the model and manufacturing plans are presented to facilitate the final industrialisation of the first prototypes. With these prototypes, developed in accordance with what has been specified throughout the work carried out, the aim is to confirm the technical and technological feasibility of the solution, with the final objective of launching this innovative solar chimney model onto the market.



# Índice

---

<b>Agradecimientos</b>	<b>15</b>
<b>Resumen</b>	<b>18</b>
<b>Abstract</b>	<b>21</b>
<b>Índice</b>	<b>23</b>
<b>Índice de Tablas</b>	<b>25</b>
<b>Índice de Figuras</b>	<b>26</b>
<b>Índice de Siglas</b>	<b>28</b>
<b>1 Introducción</b>	<b>29</b>
1.1 Contexto histórico	29
1.2 Eficiencia energética. Confort Ambiental.	31
1.3 El papel de la ventilación en el ahorro energético	34
<b>2 La chimenea solar</b>	<b>41</b>
2.1 Concepto y clasificación	41
2.2 Principio de funcionamiento	42
2.3 Estado del arte	44
2.4 Niveles de madurez de la tecnología	46
<b>3 Modelización del sistema</b>	<b>48</b>
3.1 Modelado de la transferencia de calor	48
3.2 Funcionamiento fluidomecánico del modelo permanente	50
3.2.1 Geometría del sistema	50
3.2.2 Propiedades del aire	50
3.2.3 Pérdidas de carga	51
3.2.4 Cálculo de la velocidad	52
3.3 Análisis térmico en régimen nocturno	53
3.4 Optimización de las dimensiones	55
<b>4 Industrialización del sistema</b>	<b>56</b>
4.1 Propiedades óptimas del modelo	56
4.1.1 Acristalamiento	56
4.1.2 Muro absorbedor	57
4.1.3 Componentes adicionales	62
4.2 Análisis de alternativas disponibles	62
4.2.1 Acristalamiento	62
4.2.2 Muro absorbedor	64
<b>5 Análisis de parámetros térmicos</b>	<b>66</b>
5.1 Variables de estudio	66
5.2 Consideraciones teóricas	67
5.3 Proceso de simulación	69
5.3.1 Densidad del hormigón	69
5.3.2 Calor específico del hormigón	71
5.3.3 Coeficiente de película convectivo entre el hormigón y el aire	72
5.3.4 Temperatura inicial del hormigón	73
5.3.5 Temperatura de entrada del aire	75

<b>6</b>	<b>Conclusiones del estudio e ideas fundamentales</b>	<b>77</b>
6.1	<i>Síntesis del análisis paramétrico</i>	77
6.2	<i>Interpretación de los resultados</i>	78
6.3	<i>Estudio del caso óptimo</i>	79
6.4	<i>Conclusiones finales</i>	80
<b>7</b>	<b>Consideraciones adicionales del sistema</b>	<b>82</b>
7.1	<i>Instalación de la chimenea solar sobre fachada</i>	82
7.1.1	Normativa local	82
7.1.2	Recuperación de calor	83
<b>8</b>	<b>ANEXO I. REPRESENTACIÓN DEL MODELO Y PLANOS DE FABRICACIÓN</b>	<b>84</b>
8.1	<i>Partes de la chimenea solar</i>	84
8.1.1	Soporte inferior para entrada de aire	84
8.1.2	Sistema de ventilación auxiliar	84
8.1.3	Soporte intermedio de unión con muro absorbedor	85
8.1.4	Cuerpo del muro absorbedor	86
8.1.5	Acristalamiento	86
8.1.6	Sistema de salida de aire	87
8.1.7	Sistema de control y cableado	88
8.2	<i>Unión entre componentes</i>	88
8.3	<i>Representación del conjunto</i>	88
8.4	<i>Planos de detalle</i>	92
	<b>Referencias</b>	<b>93</b>

# ÍNDICE DE TABLAS

---

Tabla 1. Estrategias convencionales para minimizar el régimen de calefacción en edificios [13]	32
Tabla 2. Estrategias convencionales para minimizar el régimen de refrigeración en edificios [13]	33
Tabla 3. Efectos perjudiciales de contaminantes en interior de edificios	35
Tabla 4. Revisión de la literatura [5], [13]:	45
Tabla 5. Niveles de madurez de la tecnología [30]	47
Tabla 6. Valores del coeficiente de pérdidas [13]	51
Tabla 7. Resultados del cálculo de la velocidad [13]	52
Tabla 8. Parámetros de cálculo del sistema	53
Tabla 9. Datos de entrada para el modelo en régimen nocturno	54
Tabla 10. Resultados obtenidos para el modelo en régimen nocturno	54
Tabla 11. Valores óptimos de geometría de una chimenea solar [13]	55
Tabla 12. Propiedades óptimas del acristalamiento	57
Tabla 13. Propiedades óptimas del muro absorbedor	58
Tabla 14. Norma UNE-EN 14992:2008+A1:2012, tabla 2 - Tolerancias de medidas	60
Tabla 15. Norma UNE-EN 14992:2008+A1:2012, tabla 3 - Tolerancias respecto a la planicidad de las superficies	60
Tabla 16. Ejemplo de marcado CE [33]	61
Tabla 17. Fabricantes de acristalamientos contactados	63
Tabla 18. Características modelo ClimaGuard 1.0+, Guardian Glass	64
Tabla 19. Fabricantes de hormigón contactados	65
Tabla 20. Valores dimensionales optimizados	66
Tabla 21. Parámetros iniciales de estudio	67
Tabla 22. Variación en la densidad del hormigón	70
Tabla 22. Variación en el calor específico del hormigón	71
Tabla 22. Variación en el coeficiente de película convectivo	73
Tabla 22. Variación en la temperatura inicial del hormigón	74
Tabla 26. Variación en la temperatura de entrada del aire	75
Tabla 26. Síntesis del análisis paramétrico	78
Tabla 22. Parámetros de entrada en el caso óptimo	79
Tabla 22. Variación en la densidad del hormigón	80

# ÍNDICE DE FIGURAS

---

Figura 1. Emisiones totales de CO <sub>2</sub> generadas por combustión y procesos industriales [1]	29
Figura 2. Aumento de la temperatura global [29]	29
Figura 3. Estructura de consumo de energía final por fuentes (2010) [3]	30
Figura 4. Estructura de consumo de energía final por fuentes (2020) [3]	30
Figura 5. Escala de sensación térmica [EKOARK arquitectura bioclimática]	31
Figura 6. Esquema de funcionamiento de una protección solar fija	34
Figura 7. Regulación de la temperatura del edificio según especie vegetal y estación	34
Figura 8. Ventilación natural en edificios [Elaboración propia]	35
Figura 9. Ventilación convectiva en edificios [Elaboración propia]	36
Figura 10. Ventilación forzada en edificios [Elaboración propia]	36
Figura 11. Ventilación híbrida en edificios [Elaboración propia]	36
Figura 12. Ventilación del edificio mediante colocación de obstáculos externos	37
Figura 13. Flujo de aire con entrada media y salida variable	38
Figura 14. Flujo de aire con entrada variable y salida fija	38
Figura 15. Cisterna con torres de viento, Irán	39
Figura 16. Torre de viento. Esquema de funcionamiento [12]	39
Figura 17. Captares de viento junto con qanat	40
Figura 18. Torres de viento, Sevilla	40
Figura 19. Estructura principal de una chimenea solar [13]	41
Figura 20. Esquema básico de chimenea solar sobre fachada de edificio [Elaboración propia]	41
Figura 21. Componentes básicos de chimenea solar [Elaboración propia]	42
Figura 22. Transmisión de calor en chimenea solar durante el día [Elaboración propia]	43
Figura 23. Transmisión de calor en chimenea solar durante la noche [Elaboración propia]	43
Figura 24. Intercambio convectivo en el canal de la chimenea [Elaboración propia]	48
Figura 25. Aumento de superficie de captación con y sin aletas [Elaboración propia]	49
Figura 26. Geometría de la chimenea propuesta [13]	50
Figura 27. Representación DTLM [Elaboración propia]	68
Figura 28. Variación de la DTLM debido a variación en la temperatura inicial del hormigón [Elaboración propia]	75
Figura 29. Variación de la DTLM debido a variación en la temperatura de entrada del aire [Elaboración propia]	76
Figura 30. Instalación de ascensor sobre acerado	82
Figura 31. Soporte inferior para entrada de aire	84
Figura 32. Sistema de ventilación	85
Figura 33. Soporte intermedio de unión con muro absorbedor	85



Figura 34. Cuerpo del muro absorbedor	86
Figura 35. Acristalamiento	87
Figura 36. Sistema de salida de aire	87
Figura 37. Sistema y de control y cableado	88
Figura 38. Vista frontal del modelo	89
Figura 39. Vista trasera del modelo	90
Figura 40. Plano de despiece del modelo	91

# ÍNDICE DE SIGLAS

---

ACV: Análisis de Ciclo de Vida

AIE: Agencia Internacional de la Energía

CFD: Dinámica de Fluidos Computacional

DTLM: Diferencia de Temperatura Logarítmica Media

NASA: National Aeronautics and Space Administration

IDAE: Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía

OMS: Organización Mundial de la Salud

RAE: Real Academia Española

REBT: Reglamento Electrotécnico de Baja Tensión

RITE: Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios

TRL: Technology Readiness Levels

# 1 INTRODUCCIÓN

## 1.1 Contexto histórico

El rápido avance que el ser humano ha experimentado durante la última etapa de su evolución ha supuesto un impacto en la naturaleza a escalas nunca vistas. La actividad que desarrollamos en el planeta modifica nuestro entorno. Acciones que realizamos en pos de nuestra supervivencia y mejora como especie están traducándose en problemas de enorme magnitud que debemos solucionar lo antes posible.

El cambio climático es uno de los mayores quebraderos de cabeza para la humanidad actual. La subida de la temperatura del planeta debido al incremento de CO<sub>2</sub> causado por la actividad humana está desembocando en la subida del nivel del mar, sequías cada vez más frecuentes o la pérdida de especies, incapaces de adaptarse a la velocidad del cambio que estamos provocando.

De hecho, una vez superado el año marcado por el COVID-19, el mundo ha alcanzado un nuevo récord en emisiones de CO<sub>2</sub> a escala global, alcanzando las 36.3 Gigatoneladas en 2020 según la Agencia Internacional de la Energía (AIE) [1].

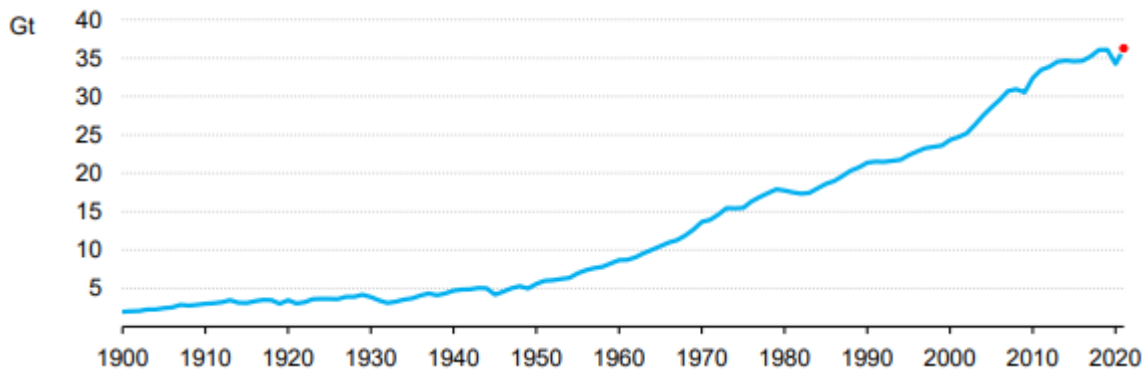


Figura 1. Emisiones totales de CO<sub>2</sub> generadas por combustión y procesos industriales [1]

Se ha demostrado que este incremento continuo de emisiones está estrechamente relacionado con el incremento de la temperatura global. No hay más que comparar el gráfico anterior con el siguiente, donde se muestra el aumento de la temperatura global para prácticamente el mismo período de tiempo.

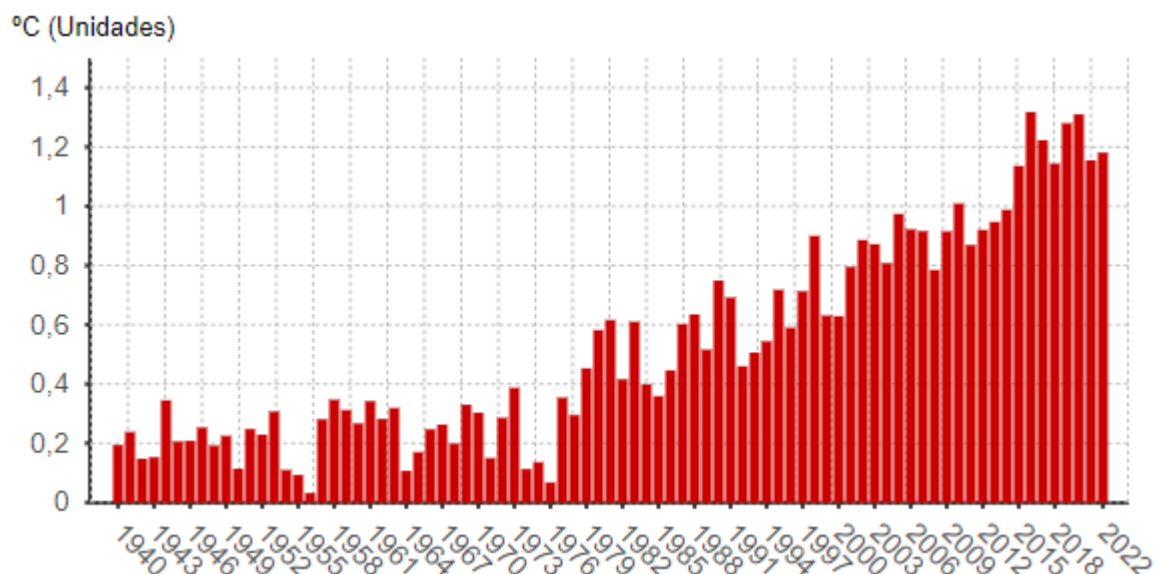


Figura 2. Aumento de la temperatura global [29]

Para reducir este impacto, se han sucedido iniciativas encabezadas por diversos sectores, hasta el punto de que

son varios los gobiernos que ponen en común conocimientos y medidas para actuar conjuntamente. Ejemplos de estos son el protocolo de Kioto o el Acuerdo de París. Concretamente, este último es un tratado internacional adoptado a finales de 2015, que tiene como objetivo limitar el calentamiento mundial por debajo de los 2°C. Aunque está claro que desde entonces las medidas llevadas a cabo no son todas las que deberían, sí es cierto que los años transcurridos desde su entrada en vigor ya han dado lugar a soluciones para conseguir reducir las emisiones de CO<sub>2</sub>, provocando la aparición de nuevas tecnologías y mercados.

Las soluciones de cero emisiones se vuelven cada vez más competitivas en todos los sectores económicos. La AIE augura que, para 2030, las soluciones de cero emisiones de Carbono podrían ser competitivas en sectores que representan más del 70 % de las emisiones mundiales [2].

Esta tendencia se hace notar principalmente en los sectores de la energía y el transporte, creando verdaderas oportunidades de negocio para nuevas empresas, y ha supuesto un esfuerzo importante para grandes empresas internacionales (que localizaban su capital inversor en tecnologías relacionadas con combustibles fósiles) para reciclarse y modernizarse.

El sector residencial por otra parte no ha visto especialmente modificadas sus necesidades energéticas. Un estudio anual desarrollado por el Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE) muestra la estructura de consumo de energía final por fuentes. Se muestran las gráficas relativas a los años 2010 y 2020, con el fin de analizar cambios en el origen de los consumos [3]:

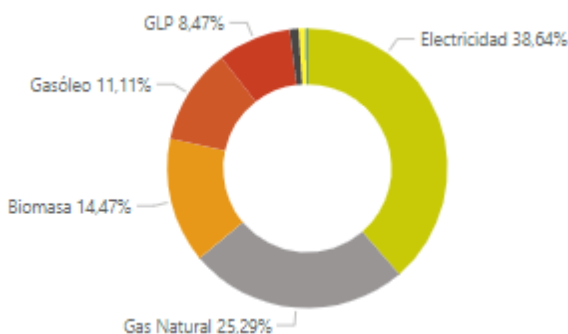


Figura 3. Estructura de consumo de energía final por fuentes (2010) [3]

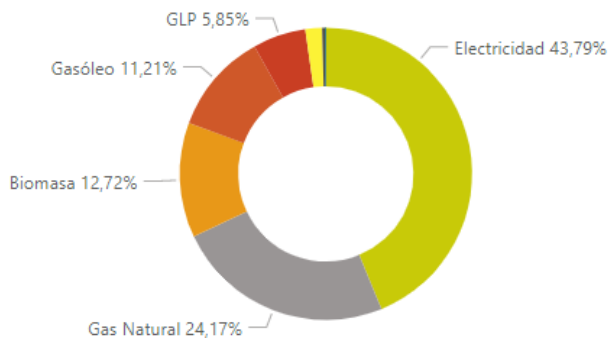


Figura 4. Estructura de consumo de energía final por fuentes (2020) [3]

Aunque el estudio muestra que el número de toneladas equivalentes de petróleo empleadas en el sector residencial se ha reducido desde 16.839 ktep a 14.377 ktep, se puede observar como este sector es cada vez más dependiente de la electricidad.

Esta electricidad es la fuente de energía principal de electrodomésticos como frigoríficos y aires acondicionados, que utilizan la energía eléctrica para realizar intercambios de calor para evacuar el calor de los cuerpos sobre los que actúan.

Precisamente este es uno de los puntos principales en los que se apoya este estudio, que tiene como objetivo la búsqueda de la eficiencia energética en edificios manteniendo el confort de las personas, poniendo el foco en la ventilación y refrigeración del edificio.

Aquí reside la importancia de este estudio y de la eficiencia energética: la búsqueda de técnicas y tecnologías

que permitan al usuario tener las mismas prestaciones de confort con un menor consumo, disminuyendo finalmente la necesidad de fuentes de energía no renovables y disminuyendo así la huella de Carbono y el efecto invernadero.

En el siguiente apartado se definen algunos conceptos de utilidad para el entendimiento posterior del estudio realizado.

## 1.2 Eficiencia energética. Confort Ambiental.

La definición de eficiencia energética según la Real Academia Española (RAE) es la relación entre la producción de un rendimiento y el gasto de energía [4]. La aplicación de técnicas como las que se muestran en este estudio disminuye el gasto energético, y por tanto se aumentará la eficiencia energética de la instalación.

La dificultad del análisis reside en aumentar la eficiencia energética sin reducir el confort del ocupante. El confort ambiental se define como el punto de equilibrio entre el usuario y el entorno, de manera que sus condiciones de operación sean las de máxima eficiencia.

Se trata por tanto de una relación entre el entorno y el ocupante del espacio, con lo que ambos agentes intervienen e influyen entre sí. Por un lado, los parámetros ambientales de confort son las características del propio espacio, acciones generadas por el medio y que reciben las personas que lo ocupan. Estos parámetros son medibles por el usuario, a fin de modelarlos según sus necesidades y adecuar así una respuesta arquitectónica [5]. Por otro lado, los factores de confort del usuario son las características que corresponden a los propios ocupantes del terreno. Son condiciones externas al entorno, pero que afectan a la apreciación de dicho ambiente por parte del usuario.

El confort en interiores puede clasificarse en tres grandes campos según la apreciación del usuario:

- Confort visual: es la facilidad de nuestra visión de percibir aquello que nos interesa.
- Confort acústico: tiene como objetivo la eliminación de todo sonido no deseado.
- Confort climático o térmico: se centra en la percepción de unas temperatura y calidad del aire aceptables

El ámbito de estudio de este documento se centra en el análisis del confort térmico, a partir de la propuesta de la chimenea solar.

Entrando ligeramente en detalle sobre el último campo enunciado, el confort térmico se describe como el punto en el cual el hombre puede adaptarse al ambiente con el gasto mínimo de energía (Olgay, 1963). El resultado de este fenómeno se resume en una sensación de bienestar con respecto a la temperatura, la cual depende de la relación que existe entre el calor producido por el ser humano y las pérdidas de calor de las superficies envolventes del entorno.

La respuesta fisiológica que tiene al ser humano frente a los cambios de temperatura es la homeostasis, que le permite regular su temperatura para adecuarse al ambiente. El ser humano tiene dos formas de disipar el calor: la disipación que se produce por la piel por fenómenos de conducción, convección y radiación (calor sensible); y el calor que se elimina por evaporación mediante la transpiración y la respiración (calor latente).

Los parámetros que regulan la temperatura ambiente y que afectan el confort humano son: temperatura del aire, radiación solar, movimiento del aire y humedad (Olgay, 1963). La combinación de todos estos factores confluye en una temperatura final que se conoce como temperatura operativa. Para asegurar una correcta sensación de confort del usuario, un rango de temperatura adecuado es entre 20-24 °C. Cuando la temperatura operativa no está comprendida en el rango señalado el usuario percibe una sensación térmica de cierta molestia, que será más perceptible conforme esta se aleja del rango óptimo:



Figura 5. Escala de sensación térmica [EKOARK arquitectura bioclimática]

Para el ser humano, históricamente siempre ha sido un verdadero reto (por el que pasa su propia supervivencia) conseguir un ambiente térmicamente confortable. Desde de su período nómada a sedentario, las personas siempre han utilizado los espacios interiores para resguardarse de las condiciones climáticas adversas. Es obvio que el aumento de la temperatura global ha supuesto un incremento importante en las necesidades energéticas en términos de refrigeración [6]. Como se ha comentado, esto puede suplirse con una respuesta en términos de producción de energías renovables, o mejor aún: contar con edificios con altas calidades constructivas que permitan a los usuarios encontrarse dentro de los límites del confort térmico tanto en régimen de calefacción como de refrigeración. La demanda energética de un edificio es el incremento entre las pérdidas térmicas del edificio y las ganancias netas de este (para los meses de invierno) y el incremento entre las ganancias y las pérdidas (para los meses de verano).

De acuerdo con la información proporcionada por el Grupo Termotecnia de la Universidad de Sevilla, se muestran algunas estrategias convencionales para combatir los efectos de los parámetros ambientales del entorno de forma eficiente, tanto en régimen de calefacción como en régimen de refrigeración.

En régimen de calefacción, la demanda energética puede obtenerse de forma simplificada mediante la expresión sencilla:

$$\text{Demanda} = \text{Pérdidas} - \text{Ganancias netas}$$

Siendo a su vez:

$$\text{Ganancias netas} = \text{Ganancias brutas} * \text{Factor de utilización}$$

En el régimen de calefacción en edificios, energéticamente se trata de reducir las pérdidas y aumentar las ganancias. Las técnicas empleadas para ello se engloban en cuatro paquetes: la transmisividad de la cubierta del edificio y la optimización de las infiltraciones (reducir pérdidas), y aumentar el área Sur equivalente, aumentar el factor de utilización (aumentar ganancias).

	Descripción	Reducir pérdidas		Aumentar ganancias	
		Transmisión	Infiltración y ventilación	Aumentar área Sur equivalente	Aumentar factor de utilización
<b>Ubicación del edificio</b>					
<b>Diseño del edificio</b>	Compacidad				
	Superficie acristalada y orientación				
<b>Elementos convencionales</b>	Mejora aislamiento opacos				
	Mejora calidad ventanas				
	Tratamiento de puentes térmicos				
	Estanqueidad y estrategias de ventilación				
	Inercia				

Tabla 1. Estrategias convencionales para minimizar el régimen de calefacción en edificios [13]

Se trata por tanto de disminuir al mínimo el intercambio de calor con el exterior. Como algunos ejemplos, un edificio orientado hacia el Sur presenta una menor demanda de calefacción que un edificio orientado hacia el Norte. Aumentar la compacidad supone una reducción de pérdidas en términos de transmisión (mayor compacidad supone menores pérdidas). Realizar un tratamiento de los puentes térmicos que se encuentran en los contornos de huecos como ventanas puede disminuir la transmisión, reduciendo así las pérdidas.

En régimen de refrigeración, la demanda energética puede obtenerse análogamente mediante la expresión

sencilla:

$$Demanda = Ganancias - Pérdidas \text{ netas ventilación nocturna}$$

Siendo a su vez:

$$Pérdidas \text{ netas ventilación nocturna} = Frío \text{ almacenado y restituido} * Factor \text{ de utilización}$$

El régimen de refrigeración tiene como objetivo precisamente lo contrario: aumentar las pérdidas y disminuir las ganancias. Aumentar las renovaciones de aire nocturno aprovechando las horas con temperaturas más bajas o aumentar el área Norte equivalente son algunas de las medidas utilizadas para este cometido.

Se intenta aumentar al máximo el intercambio de calor con el exterior.

A continuación, se muestra igualmente una tabla a modo de resumen con las principales medidas destinadas a disminuir la necesidad de refrigeración en edificios:

	Descripción	Reducir ganancias		Aumentar pérdidas	
		Transmisión	Solares	Aumentar renovaciones de aire nocturno	Aumentar factor de utilización
<b>Ubicación del edificio</b>					
<b>Diseño del edificio</b>	Superficie acristalada				
	Orientación y distribución de la superficie acristalada				
<b>Elementos convencionales</b>	Mejora aislamiento cubierta				
	Control solar				
	Ventilación nocturna				
	Inercia				

Tabla 2. Estrategias convencionales para minimizar el régimen de refrigeración en edificios [13]

Como puede apreciarse, medidas que favorecen un modo de funcionamiento pueden perjudicar al otro, por lo tanto, interesa llegar a soluciones intermedias o llevar a cabo el diseño considerando el déficit predominante que afecta al edificio.

Este diseño tiene tal importancia en la transmisión de calor y en la reducción de demanda energética, que pueden modelarse edificios capaces de absorber la radiación solar en los meses de invierno y servir de barrera en los meses de verano, aprovechando factores como la inclinación de los rayos del Sol en cada estación.

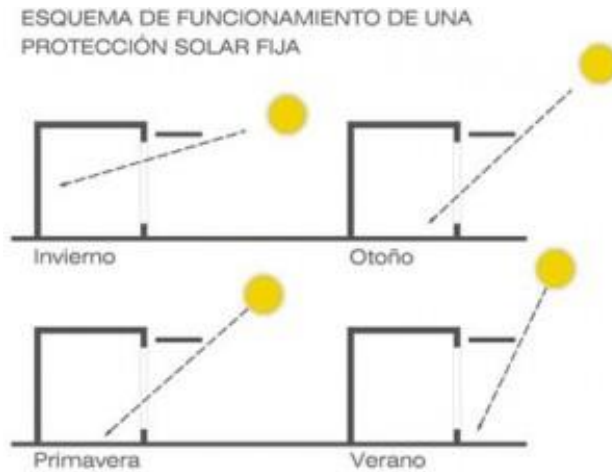


Figura 6. Esquema de funcionamiento de una protección solar fija

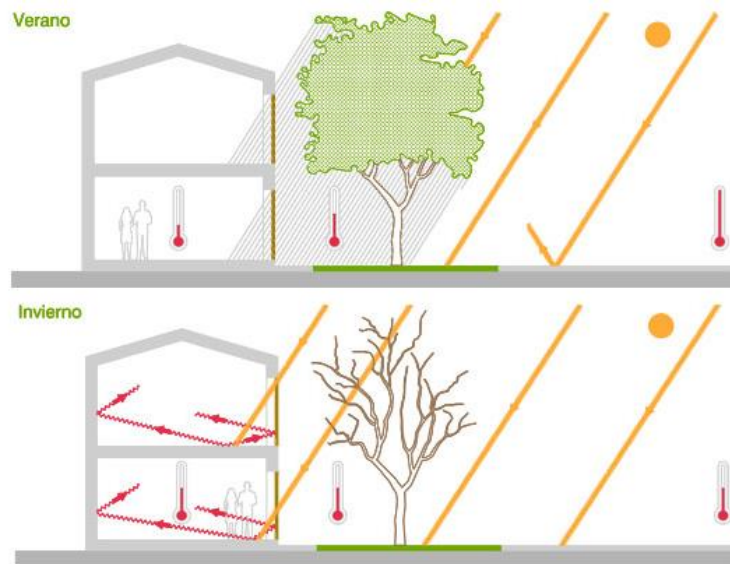


Figura 7. Regulación de la temperatura del edificio según especie vegetal y estación

Este diseño del edificio aprovechando los recursos disponibles (como el Sol, la vegetación o el viento) para disminuir los impactos ambientales y reducir el consumo de energía es lo que se conoce como arquitectura bioclimática [7].

### 1.3 El papel de la ventilación en el ahorro energético

La ventilación en los edificios es un agente fundamental para la mantener un confort adecuado y una atmósfera saludable. La presencia de distintos materiales y compuestos en el interior de las viviendas provoca que la concentración de sustancias dañinas para el organismo sea mayor dentro que fuera de los edificios. De hecho, la Organización Mundial de la Salud (OMS) asegura que el aire de los hogares está de media entre dos y cinco veces más contaminado que el del exterior [8].

Algunos de los principales contaminantes en el interior de los hogares son el formaldehído (provoca irritaciones), compuestos de Carbono (suelen encontrarse en ambientadores y productos de limpieza) y el dióxido y monóxido de Carbono, que en lugares con poca ventilación superan con facilidad las concentraciones de exterior.

En la siguiente tabla se muestran algunos contaminantes, junto con sus efectos perjudiciales y las concentraciones en el interior y en el exterior, respectivamente.



Contaminante	Efectos	Concentración en aire interior (mg/m <sup>3</sup> )	Concentración en aire interior (mg/m <sup>3</sup> )
<b>Formaldehído (HCHO)</b>	Irritación en piel, ojos, nariz y garganta. Agente cancerígeno.	0,008-0,53 (1,2)	0,001-0,020 (4)
<b>Benceno</b>	Agente cancerígeno.	0,002-0,0871 (2)	0,0051-0,0146 (5)
<b>Monóxido de Carbono</b>	Dolores de cabeza, náuseas, mareos y somnolencia. En grandes concentraciones provoca la muerte (“muerte dulce”)	0,5-33 (2)	1,15-6,9 (6)
<b>Dióxido de Carbono</b>	Dolores de cabeza, falta de concentración	608-11456 (3)	590-976 (3)

Tabla 3. Efectos perjudiciales de contaminantes en interior de edificios

Por ello, el Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios (RITE), aprobado por el Real Decreto 1027/2007 impone unas exigencias técnicas que cumplir, entre las que se incluye una calidad del aire interior adecuada a cada actividad.

En su Instrucción Técnica 1.1.4 *Exigencia de calidad del aire interior*, se especifica la necesidad de un sistema de ventilación que aporte el caudal de aire exterior suficiente, que evite la formación de elevadas concentraciones de contaminantes [9].

Para ello, en función del uso de local, el RITE clasifica la calidad del aire interior en cuatro categorías (IDA), de la forma:

- IDA 1 (aire de óptima calidad): hospitales, clínicas, laboratorios y guarderías
- IDA 2 (aire de buena calidad): oficinas, locales comunes de hoteles y residencias, museos, aulas de enseñanza, entre otras aplicaciones.
- IDA 3 (aire de calidad media): edificios comerciales, cines, teatros, salones de actos, habitaciones de hoteles, restaurantes, cafeterías y bares, salas de fiestas y gimnasios.
- IDA 4 (aire de baja calidad): no considerado en ninguna aplicación.

Saliendo un poco de la parte aplicable de salubridad (de gran importancia, aunque fuera del alcance de este trabajo), este estudio se centra en analizar cómo afecta la ventilación en el ahorro energético.

En general, la ventilación puede clasificarse en cuatro tipos:

- Ventilación natural: consiste en permitir la entrada y salida de aire externo en el interior del edificio, favoreciendo su circulación y renovación sin que intervengan factores mecánicos. Algunas prácticas que permiten que la ventilación natural sea lo más eficaz posible son la colocación de las ventanas en fachadas opuestas, sin obstáculos entre ellas y en fachadas que sean transversales a la dirección de los vientos dominantes.

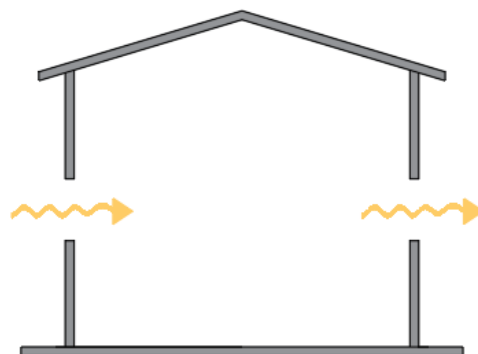


Figura 8. Ventilación natural en edificios [Elaboración propia]

- Ventilación convectiva: puede considerarse un tipo de ventilación natural. Se produce cuando el aire caliente (y por tanto de menor densidad) asciende, siendo este reemplazado por un aire más frío. Para favorecer este tipo de ventilación interesa colocar las aperturas en la parte superior e inferior del edificio.

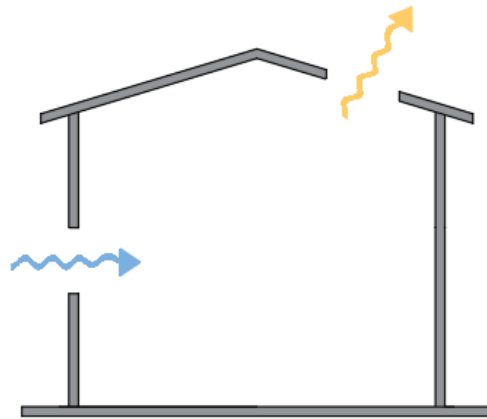


Figura 9. Ventilación convectiva en edificios [Elaboración propia]

- Ventilación forzada: es el proceso por el cual se introduce aire fresco en el interior del edificio a través de instalaciones que funcionan con energía eléctrica, por lo que este tipo de ventilación supone un consumo de energía.

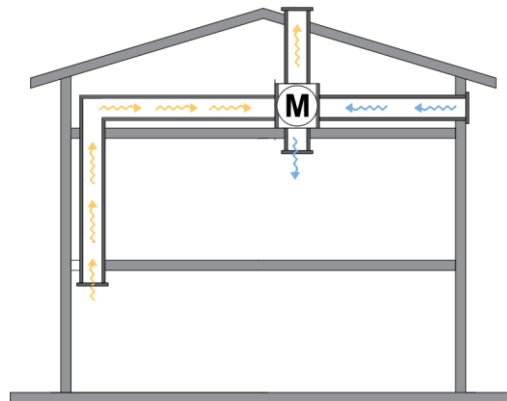


Figura 10. Ventilación forzada en edificios [Elaboración propia]

- Ventilación híbrida: es la combinación entre ventilación natural y forzada, en la cual predomina la ventilación natural si existen condiciones favorables de funcionamiento. Cuando no se activan los mecanismos que hacen posible la ventilación natural, es necesario recurrir a la ventilación forzada, para cumplir con los requisitos de ventilación del edificio.

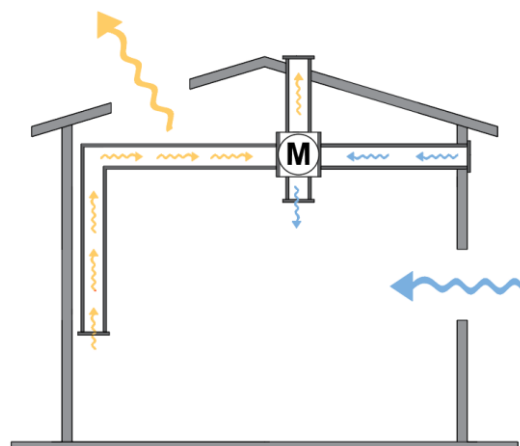


Figura 11. Ventilación híbrida en edificios [Elaboración propia]

Para reducir el consumo en el régimen de refrigeración en días calurosos de verano, resulta muy conveniente ventilar durante la noche y no permitir la circulación excesiva de aire durante el día (ventilación natural). Como se verá más adelante, el estudio llevado a cabo en este documento se basa en gran medida en esta idea, amplificando estos efectos gracias a la chimenea solar, objeto de estudio de este trabajo, que provoca la salida del aire caliente de la cámara a gran temperatura permitiendo así la entrada de aire frío del exterior (ventilación convectiva).

En la chimenea solar que se analiza en este documento se intenta maximizar el funcionamiento con ventilación natural por razones obvias. Sin embargo, cuando no existe radiación solar en horas debido a condiciones climáticas adversas, se mostrará más adelante que no puede producirse la circulación de aire.

Como lo deseado sería que la chimenea solar sustituyera al sistema de ventilación del edificio, será necesario dotar a la chimenea de algún motor o tecnología de extracción que provoque la circulación del aire, permitiendo así cumplir los requisitos de ventilación. Esta será la última opción y se evitará siempre que sea posible.

A modo divulgativo, resulta interesante analizar algunos ejemplos de arquitectura bioclimática. El aprovechamiento de la posición de obstáculos o de la utilización de especies vegetales para reducir la demanda energética es una de las medidas que a priori puede resultar más intuitiva, en la cual se pueden crear corrientes de aire que favorezcan la ventilación natural (figura 7) o aprovechar la propia biología de una especie vegetal para utilizarla como barrera solar según la estación del año (figura 12).

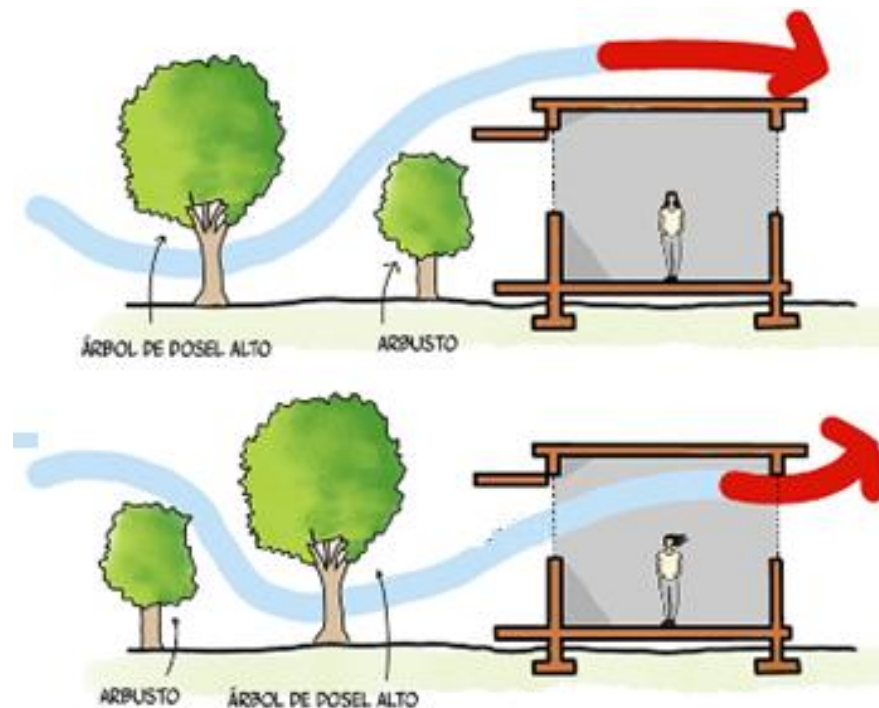


Figura 12. Ventilación del edificio mediante colocación de obstáculos externos

Uno de los parámetros que influye en gran medida en el confort y el ahorro en el régimen de refrigeración son las aperturas en el edificio. Las corrientes de aire que circulan por el interior dependen a su vez del número, el tamaño y la posición de dichos orificios.

Estudios realizados por Víctor Olgyay concluyen que el número de orificios óptimo es de al menos 2, y que su sección y posición dependerán de los requerimientos de la instalación (como por ejemplo la incidencia de la corriente sobre el usuario) [5]. De esta manera, el autor del estudio muestra algunas combinaciones interesantes:

- Entrada a altura media y salida variable: la altura del orificio de entrada se mantiene constante a una altura media y la altura del orificio de salida varía. El flujo de aire interior fue similar, con cierta tendencia de descenso del aire independientemente de la colocación de la abertura de salida.

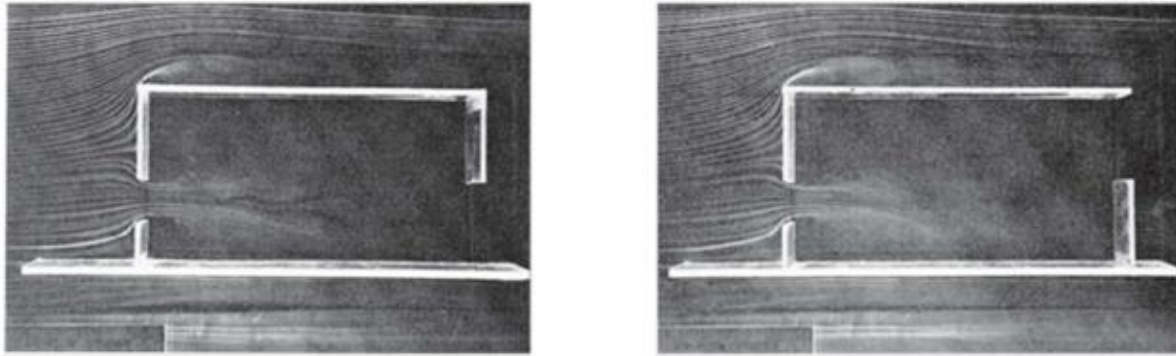


Figura 13. Flujo de aire con entrada media y salida variable

- Entrada variable y salida a altura media: la altura del orificio de entrada varia y la altura del orificio de salida se mantiene constante. En este caso el flujo de aire si se ve influenciado por la posición de la abertura de entrada. Para la altura superior la tendencia del flujo es de ir hacia arriba, por la presión que ejercen las corrientes exteriores en ese sentido. Para una posición baja el efecto es de un barrido laminar a la altura del suelo.

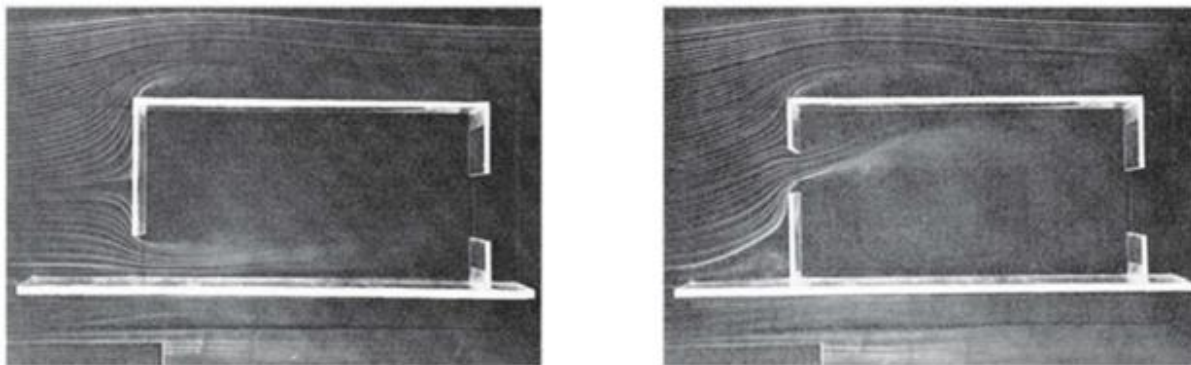


Figura 14. Flujo de aire con entrada variable y salida fija

La ventilación nocturna es una de las técnicas de refrigeración pasiva (sin consumo de energía) más eficaces [10]. La eficacia de la técnica se basa principalmente en la diferencia relativa entre las temperaturas exterior e interior durante el periodo nocturno. Sin embargo, para un lugar determinado, el potencial de refrigeración de las técnicas de ventilación nocturna depende del caudal de aire, de la capacidad térmica del edificio y del acoplamiento adecuado de la masa térmica y el caudal de aire.

Se han llevado a cabo diversos estudios que muestran cuantitativamente que la ventilación nocturna disminuye la temperatura diurna del aire interior [11], lo que se traduce en una mejora significativa del confort final del usuario. Se verá con más detalle en apartados posteriores de este documento.

La ventilación natural utiliza el aire como medio disipador de calor. Existen varios métodos de ventilación natural, pudiendo clasificarse como ventilación impulsada por el viento (como torres de viento) o ventilación impulsada por flotabilidad (como chimeneas solares).

Las torres de viento son un método de ventilación impulsada por viento utilizada desde milenios, siendo Irán su mayor exponente.



Figura 15. Cisterna con torres de viento, Irán

Se muestra de forma resumida el funcionamiento: en la parte superior del edificio se encuentra la propia torre de viento, que normalmente tiene aberturas en los cuatro laterales para aprovechar el viento proveniente de cada orientación. El aire entra en el edificio a través de la abertura enfrentada a la circulación del viento, que posteriormente saldrá por el efecto chimenea [12].

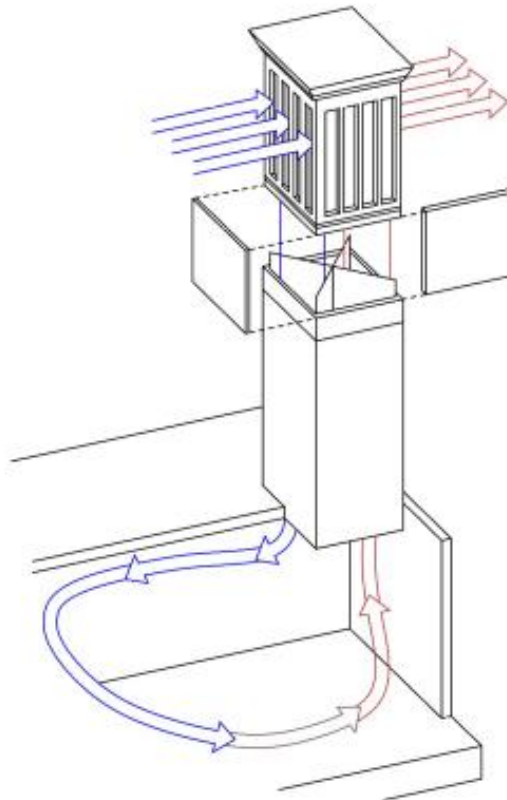


Figura 16. Torre de viento. Esquema de funcionamiento [12]

Este efecto chimenea puede verse potenciado por el qanat. El qanat es el conducto a través del cual se produce el intercambio de calor entre el aire caliente proveniente del exterior y una masa de agua que suele ser un depósito o cisterna. Este aire caliente cede calor al agua enfriándose y humedeciéndose, entrando entonces en el edificio disminuyendo la temperatura interior. Se produce entonces una corriente en el edificio, puesto que este aire será evacuado por la torre de viento una vez haya vuelto a calentarse.

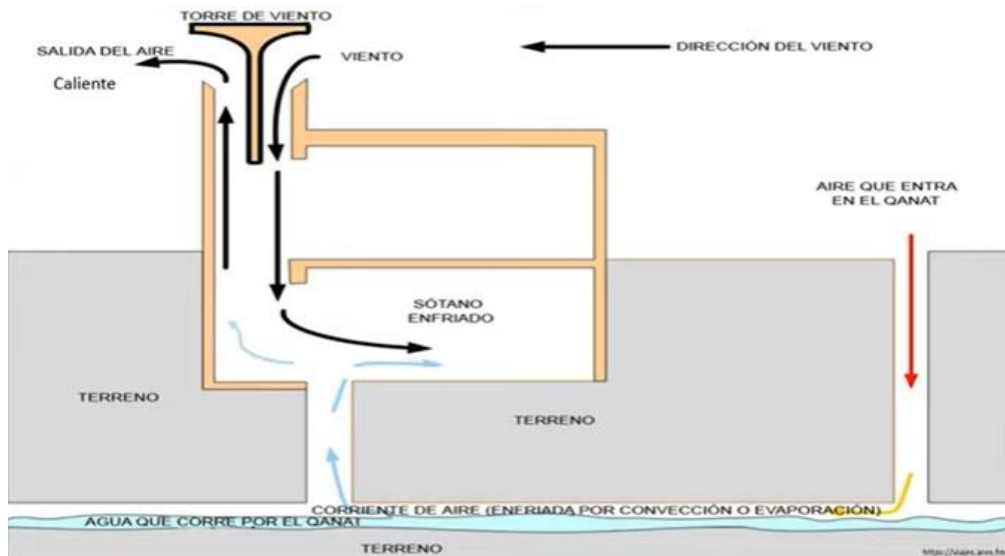


Figura 17. Captares de viento junto con qanat

Las torres de viento se encuentran actualmente en una etapa de estudio, aunque existen algunos ejemplos de su construcción. Uno de los más cercanos y contemporáneos se ejecutó en Sevilla para la Expo Sevilla 92', en la cual se colocaron 12 torres de viento. Aunque no se lograron los efectos deseados, se consiguió disminuir la temperatura un máximo de 4 °C y se recabó información muy valiosa para estudios posteriores.



Figura 18. Torres de viento, Sevilla

A lo largo de este apartado se ha observado la importancia de la ventilación natural (y en concreto la ventilación nocturna), especialmente en zonas donde el calor en los meses de verano supone incrementos importantes de temperatura en el interior de los edificios. En este contexto, se han mostrado soluciones de ventilación por viento, y en el siguiente apartado se explicará con más detalle en qué consiste una chimenea solar (ejemplo de ventilación impulsada por flotabilidad) y que conformará una parte fundamental para el entendimiento de este estudio.

Como se ha observado a lo largo del apartado, la ventilación natural y en concreto la ventilación nocturna cobra especial interés en las zonas donde se manifiestan graves problemas de sobrecalentamiento dentro de los edificios en los meses de verano. Tanto en edificios residenciales como terciarios, esta necesidad queda patente para las zonas del sur de Europa (por ejemplo). Dentro de este contexto se encuentran las soluciones de chimenea solar, que pretenden aumentar la ventilación durante los meses de verano donde las condiciones climáticas son extremas.



## 2 LA CHIMENEA SOLAR

### 2.1 Concepto y clasificación

La chimenea solar puede describirse de forma sencilla como un sistema pasivo que genera un movimiento de aire gracias a la radiación solar que incide sobre esta, apareciendo entonces una diferencia de presión entre distintas capas de aire.

Se trata de una estructura normalmente vertical situada en una de las fachadas del edificio. Dicha estructura estará formada por dos superficies verticales en forma de paredes (cubierta y muro absorbedor) separadas una distancia que permitirá el paso de una masa de aire. De esta forma se forman una serie de aberturas que se comunican con el edificio y con el exterior, y que posibilitarán la transferencia de energía entre ambas.

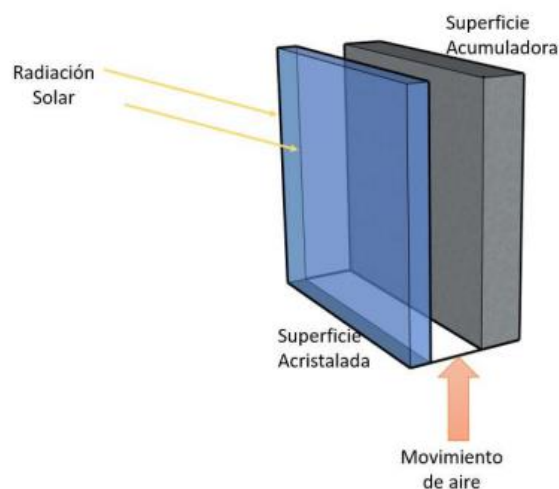


Figura 19. Estructura principal de una chimenea solar [13]

Gracias a la unión física entre la chimenea solar y el edificio, el aire interior de la habitación entra en la chimenea a través de la abertura inferior, reemplazando entonces al de la propia chimenea que sale a través de la abertura superior. De manera análoga el aire que penetra en la chimenea solar es reemplazado por el aire que entra procedente del exterior por medio de un hueco en el extremo opuesto del edificio.

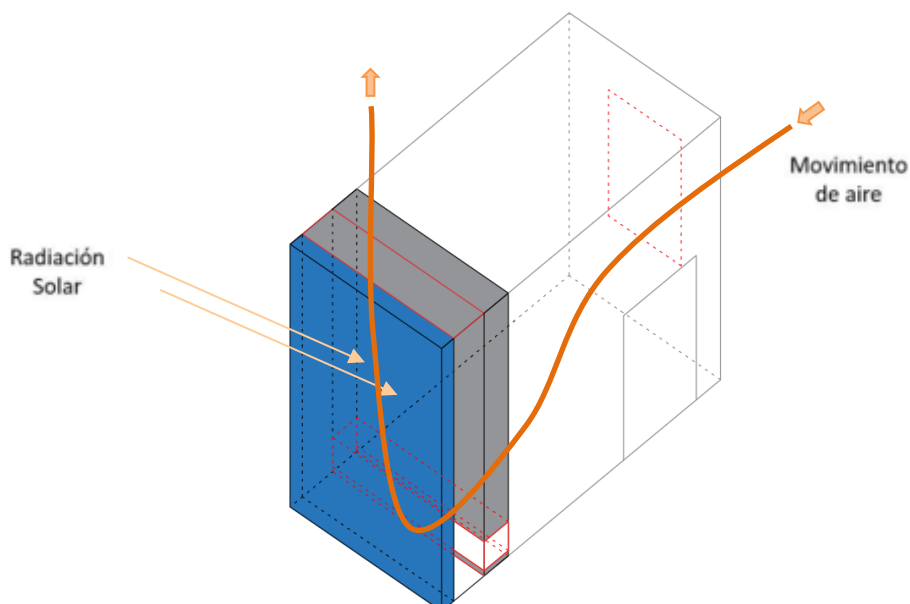


Figura 20. Esquema básico de chimenea solar sobre fachada de edificio [Elaboración propia]

## 2.2 Principio de funcionamiento

El objetivo principal de la chimenea solar es aumentar lo máximo posible la diferencia de temperatura (y con ello de presión y densidad) entre dos puntos del edificio, creando así un flujo de aire cuyos caudal y velocidad se incrementen lo máximo posible, siendo la posición, geometría o materiales empleados algunos de los factores principales para la consecución de dichos requerimientos. Este fenómeno es el denominado efecto chimenea, tal y como se ha comentado anteriormente.

A continuación, se realiza una descripción general de las partes señaladas anteriormente:

- **Cubierta:** elemento exterior del sistema. Se trata de una superficie acristalada de elevada esbeltez que refleja y absorbe la radiación exterior (tanto directa como difusa). Para aumentar dicha absorción, suelen emplearse acristalamientos, ya que lo deseado es incrementar al máximo el coeficiente de transmisión. Al llegar la cubierta a una temperatura mayor que la exterior, de forma no deseada también disipará energía por convección y radiación al ambiente, por lo que es necesario realizar un estudio exhaustivo de este componente.
- **Cámara de aire:** es el espacio comprendido entre la cubierta y el muro absorbedor, canal por el cual se produce la circulación de viento debido a la absorción de energía por radiación desde ambas superficies. La cámara de aire posee unas compuertas de entrada y salida de aire, que permitirán el continuo remplazo del fluido.
- **Muro absorbedor:** es la parte de la chimenea solar que está en contacto con el edificio. Por un lado, absorbe parte de la radiación transmitida por la cubierta acristalada para transferirla a su vez al aire de la cámara y así calentarlo. Pero además este componente tiene la misión de funcionar como acumulador de energía térmica. Esto permitirá a la chimenea solar funcionar en periodos nocturnos, donde el Sol deja de emitir radiación y el aire del exterior es más frío que durante las horas diurnas. Es por esto que la funcionalidad de la chimenea solar cobra más importancia aún durante la noche. Se intentará por tanto que el muro absorbedor tenga un elevado coeficiente de absorción. En la parte de la superficie que está en contacto con el edificio suele añadirse un aislamiento, que impida que se produzca un flujo de calor hacia el interior.

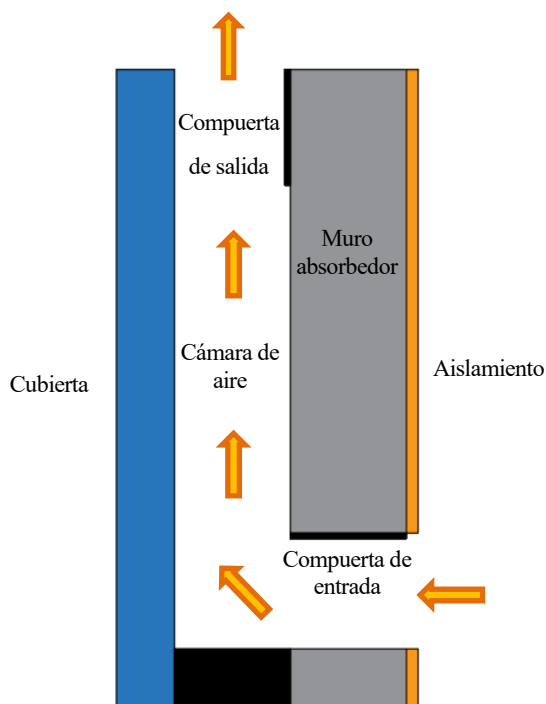


Figura 21. Componentes básicos de chimenea solar [Elaboración propia]

Entre los elementos del sistema se produce un conjunto de intercambios de calor que confluyen en la deseada circulación de aire.



Durante el día, el ambiente transfiere energía térmica por radiación y convección a la cubierta de vidrio, que absorberá parte de esta energía (la menor posible) y transmitirá el resto a la cámara de aire por convección y al muro absorbedor por radiación. A su vez, el muro absorbedor acumulará gran parte de calor para el funcionamiento nocturno (lo máximo posible), y transmitirá el resto a la cámara de aire por convección y una pequeña parte al interior del edificio. Para que este último intercambio sea mínimo se añade el aislamiento que se ha comentado anteriormente [14].

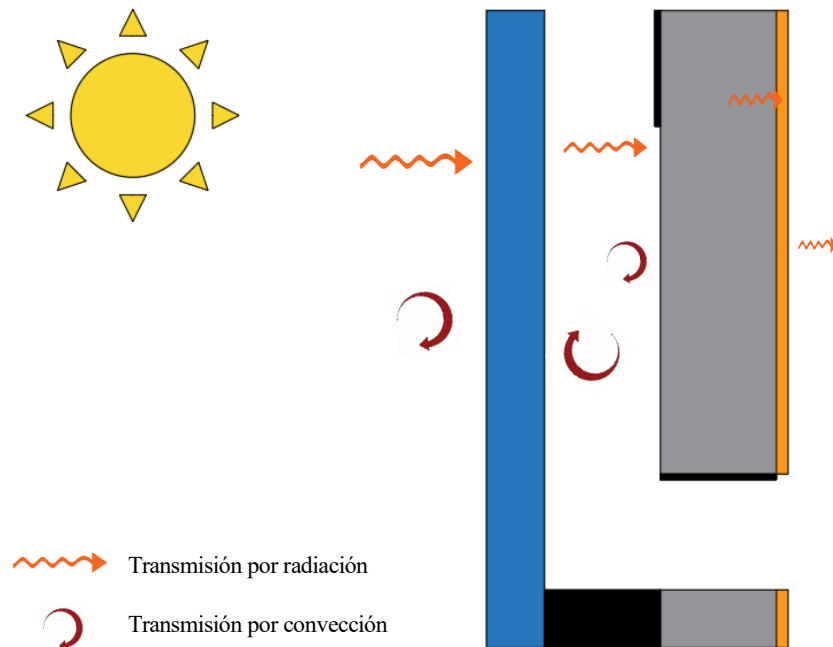


Figura 22. Transmisión de calor en chimenea solar durante el día [Elaboración propia]

Durante la noche desaparece la radiación proporcionada por el Sol. Aquí es donde interviene con eficacia el muro absorbedor: gracias al calor acumulado durante el día y a la gran inercia térmica del material, la superficie se encuentra a una temperatura mucho mayor que la ambiente, por lo que el gradiente de temperatura entre ambas es considerable. Tanto es así que este elemento será el único que transfiera calor a la cámara de aire, por convección y radiación, dando lugar a la corriente de aire. El muro absorbedor es ahora la fuente de energía térmica (en lugar del Sol) [14].

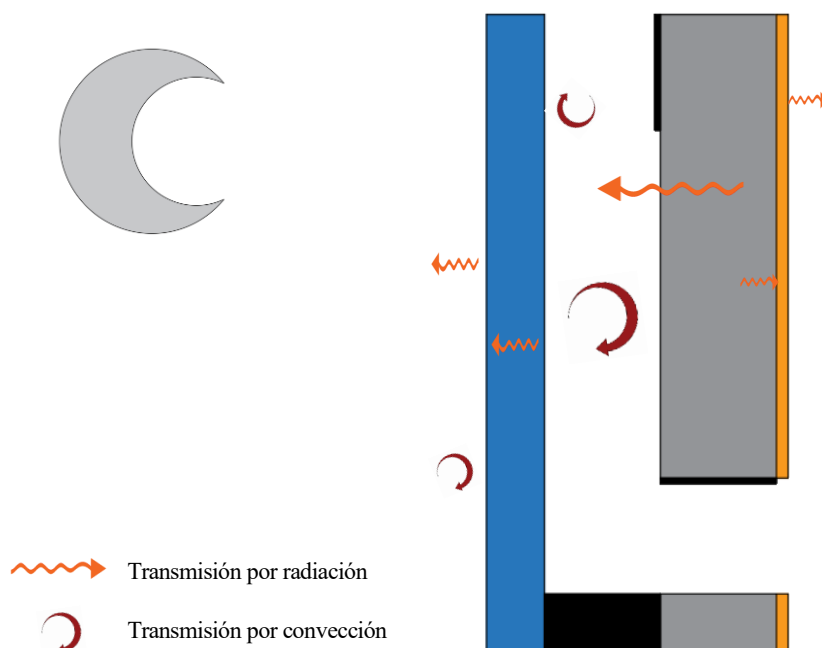


Figura 23. Transmisión de calor en chimenea solar durante la noche [Elaboración propia]

Una vez mostrados los mecanismos del intercambio de calor, se comprende cómo el aire de la cámara se ve

sometido a gradientes de temperatura que confluyen en diferencias de densidad y presión del mismo. El aire caliente de menor densidad se eleva, siendo reemplazado el vacío generado por el aire del interior del edificio, a menor temperatura, y desembocando todo ello en un flujo de aire en sentido vertical ascendente que expulsa el aire caliente del edificio mejorando las condiciones de confort de este último.

Se entiende por tanto que, si el objetivo es extraer el aire del interior del edificio (que tiene una temperatura lo suficientemente elevada como para perjudicar los niveles de confort del edificio) y ser sustituido por el aire frío del ambiente, el aire de la cámara debe estar a mayor temperatura. De hecho, cuanto mayor sea el gradiente de temperatura entre ambas, mayor será el flujo de aire y por tanto mayor será el caudal que entrará del exterior, consiguiendo por tanto mejorar el confort del espacio acondicionado [13].

Después de lo visto se comprueba fácilmente cómo la chimenea solar funciona bajo condiciones de ventilación natural convectiva, no existiendo ningún sistema de control más allá que la autorregulación ofrecida por el Sol y los materiales que conforman la chimenea. Esto hace que la chimenea solar sea un sistema económico, ya que prácticamente no supone gastos de operación y mantenimiento una vez instalada.

## 2.3 Estado del arte

En apartados anteriores se ha podido empezar a vislumbrar el potencial de este tipo de tecnologías para mejorar las condiciones de confort interior de los edificios. Se han visto ya varios casos en los que se aprovecha un gradiente de temperaturas para favorecer la aparición del flujo de aire, desde milenios atrás con las torres de viento en Irán hasta los prototipos y estudios realizados hoy en día.

Centrando el análisis en el caso de la chimenea solar, analizando bibliografía relacionada se observa cómo este sistema concreto comenzó a investigarse sobre la década de los noventa, siendo a día de hoy un área de estudio relativamente nueva y con un largo recorrido por delante.

Las investigaciones llevadas a cabo por diferentes autores han estudiado el funcionamiento de la chimenea solar desde distintos enfoques: cálculos energéticos, modelos numéricos y modelos experimentales. Sin más intención que mostrar un fragmento de los principales estudios realizados con los resultados más interesantes para este análisis, se presenta la siguiente información resumida:

Año del estudio	Apellido del autor principal	Título del estudio	Método empleado	Resultados concluyentes
1992	Barozzi [15]	Physical and Numerical Modelling of a Solar Chimney-based Ventilation System for Buildings	Experimental Simulación CFD (*)	Chimenea solar en techo. Pruebas experimentales en un modelo a pequeña escala (1:12). Ecuaciones de conservación de masa, momento y estado estacionario. La energía térmica se resuelve utilizando una formulación de volumen finito. Flujo laminar.
1993	Bansal Mathur Oliveira [16]	Solar Chimney Stack Ventilation. Building and Environment	Numérico	2.25 m <sup>2</sup> de colector solar inducen 330 m <sup>3</sup> /h con radiación solar de 1000 W/m <sup>2</sup> .
2003	Ong [17]	A mathematical model of a solar chimney	Teórico	Modelo simplificado similar al del muro Trombe. Modelo calibrado con datos experimentales
2005	Bansal, Mathur Mathur [18]	Modeling of window-sized solar chimneys for ventilation	Experimental Numérico	Posibilidad de implementar chimeneas solares como ventanas. Superficie de 1 m <sup>2</sup> generó velocidades hasta de 0.24 m/s

2007	Martí-Herrero Heras-Celemin [19]	Dynamic physical model for a solar chimney	Numérico Teórico	Chimenea inercial (ventilación nocturna) Rendimiento energético de una chimenea solar de 2 m de altura con un muro de hormigón de 0.24 m como almacenamiento térmico y 14.5cm de ancho. Consigue un caudal de ventilación de 0,011kg/s. Absorbente de concreto: temperatura máx. 2 horas de retraso por inercia térmica
2009	Ho Lee Strand [20]	Enhancement of natural ventilation in buildings using a thermal chimney	Simulación Numérico	Impacto energético. Influencia también del clima. La altura de la chimenea, la absorción solar y la transmitancia solar resultaron tener más influencia en la mejora de la ventilación natural que el ancho. Parámetro más incidente: altura de la chimenea y el menos incidente: la sección de la cámara de aire. Tiene potencial de ahorro energético de refrigeración
2015	Chung [21]	Effective solar chimney cross section ventilation performance in Malaysia terraced house	Simulación CFD (*) Experimental	Efecto de la altura y ancho. Para una sala de 36m <sup>3</sup> , el ancho efectivo varió de 0.6 m a 1.0 m mientras que la longitud de 1.5 m a 2.0 m, y la velocidad del aire inducida varió de 0.04m/s a 0.223m/s.
2017	Kasacian [22]	A review on solar chimney systems	Teórico	Revisión exhaustiva de 200 estudios en los últimos 30 años sobre sistemas de chimenea solar. 32% utilización para ventilación y 29% como sistema pasivo.
2020	Layeni [23]	Computational modelling and simulation of the feasibility of a novel dual purpose solar chimney for power generation and passive ventilation in buildings	Simulación CFD (*)	Se varía la altura, la cavidad, la condición de radiación (W/m <sup>2</sup> ) y el viento. Los caudales de aire aumentan con la velocidad del viento. Las potencias obtenidas para una radiación de 400 W/m <sup>2</sup> para una altura de chimenea de 5 y 9 m fueron 32.8 y 85.2 W/m <sup>2</sup> .
2021	Palomo [13]	Diseño innovador de chimenea solar para edificios: modelado y optimización	Teórico Numérico	Inclusión de aletas para aumentar los niveles de captación solar. Con 0.6 m de ancho, 10 aletas, separación entre aletas de 0.08 m, 9 canales y 5 m alto se obtiene una radiación total absorbida de 20.17 kW/m.

(\*) CFD: Dinámica de Fluidos Computacional

Tabla 4. Revisión de la literatura [5], [13]:

Se han realizado varios estudios acerca de la viabilidad y funcionalidad de la chimenea solar, pero lo cierto es que la gran parte de ellos se han llevado a cabo desde un punto de vista teórico, siendo modelados mediante herramientas informáticas o con el clásico cálculo matemático.

A lo sumo, algunos de ellos han desarrollado prototipos a escala, con el fin de corroborar las hipótesis formuladas.

En este trabajo se realiza un análisis de la chimenea solar de una manera más pragmática y funcional. Sirviendo como base de este documento el estudio desarrollado por Doña Teresa Rocío Palomo Amores, se profundiza en

los resultados obtenidos y el modelo propuesto para intentar llegar a un modelo de chimenea solar industrializable.

En apartados posteriores se hará hincapié en los puntos más señalados del estudio de Doña Teresa Rocío, puntos que representan los pilares a partir de los cuales se desarrolla el presente trabajo.

## 2.4 Niveles de madurez de la tecnología

Los niveles de madurez de la tecnología (más conocidos como Technology Readiness Levels o TRL) son un concepto que surge en la NASA y que posteriormente es extrapolado a cualquier tipo de proyecto [25].

Un TRL es una forma aceptada de medir el grado de madurez de una tecnología. Como es de suponer, a la hora de abordar un proyecto debe tenerse en consideración el grado de innovación en el que se encuentra la tecnología que interviene en dicho proyecto.

Los niveles inferiores conformarán tecnologías que se encuentran a un nivel más básico (a nivel de idea o concepto) mientras que los niveles más altos lo conforman las tecnologías que han sido probadas con acierto en su ámbito de aplicación.

Así, se consideran 9 niveles que se extienden desde los principios básicos de la tecnología en cuestión hasta llegar a pruebas realizadas con éxito en un entorno real [25]:

- TRL 1: Principios básicos observados y reportados.
- TRL 2: Concepto y/o aplicación tecnológica formulada.
- TRL 3: Función crítica analítica y experimental y/o prueba de concepto característica.
- TRL 4: Validación de componente y/o disposición de los mismos en entorno de laboratorio.
- TRL 5: Validación de componente y/o disposición de los mismos en un entorno relevante.
- TRL 6: Modelo de sistema o subsistema o demostración de prototipo en un entorno relevante.
- TRL 7: Demostración de sistema o prototipo en un entorno real.
- TRL 8: Sistema completo y certificado a través de pruebas y demostraciones.
- TRL 9: Sistema probado con éxito en entorno real.

Ahora bien, en trabajos de investigación (como es el caso) el TRL también lleva a cabo una clasificación que muestra las etapas que se deben llevar a cabo, desde la concepción de la misma idea hasta su despliegue y puesta en mercado.

Refiriéndonos al ciclo de vida completo de la tecnología que se pretende desarrollar, se parte desde el TRL 1, donde a partir de una primera idea novedosa se llegaría hasta la prueba de concepto en el TRL 3.

Una vez superado con éxito este nivel se tiene la certeza de que la tecnología o producto concebido es adecuado para llegar a disponer de un producto comercial.

A partir de este nivel se realizan actividades de desarrollo, pruebas e industrialización, etc..., antes de poder acceder al mercado. Estas actividades se abordarían durante el desarrollo tecnológico (TRL 4 – TRL 7) hasta su validación, y finalmente su puesta en el mercado y despliegue (TRL 8 - TRL 9).

Nivel de madurez de la tecnología	Acciones a realizar
TRL 1	Prueba de concepto e investigación industrial
TRL 2	
TRL 3	
TRL 4	Prototipo/Demostrador y desarrollo tecnológico

Nivel de madurez de la tecnología	Acciones a realizar
TRL 5	
TRL 6	
TRL 7	
TRL 8	Producto o servicio comercializable y certificaciones de pruebas específicas
TRL 9	Despliegue

Tabla 5. Niveles de madurez de la tecnología [30]

Así, conforme se recorre el presente documento se van mostrando los niveles de madurez de tecnología de nuestro diseño, en este caso de la chimenea solar.

En los primeros apartados se han mostrado el concepto y estado del arte del producto a modo de introducción y puesta en contexto (TRL1-TRL3). En los próximos apartados se mostrará de forma resumida (aunque con la debida profundidad que requiere el estudio) el trabajo de diseño, modelo y optimización de Doña Teresa Rocío, en el que modela el problema fluidomecánico y desarrolla un prototipo optimizado de forma teórica, sobre todo a nivel geométrico (TRL3-TRL5).

A partir de este punto se realiza un estudio en profundidad del modelo propuesto, buscando llegar a un producto totalmente industrializable (con todo lo que ello implica), y en el cual se realizará un análisis en detalle en cuanto a materiales, dimensiones, precios... Llegando al punto de desarrollar unos primeros planos de fabricación de un prototipo que permita demostrar la validez del modelo, obteniendo así un producto comercializable y sobre el que se puedan aplicar las pruebas específicas que se requieran (TRL5-TRL8).

# 3 MODELIZACIÓN DEL SISTEMA

## 3.1 Modelado de la transferencia de calor

A la hora de analizar el comportamiento térmico de la chimenea solar, se estudia el problema convectivo de forma aislada, desacoplado del resto de mecanismos de transmisión de calor. Esto es posible si se considera que las superficies del canal son isotermas, hipótesis usual en el cálculo mediante correlaciones de los coeficientes convectivos y en el cálculo realizado por los programas de simulación térmica de edificios [24]. Esta hipótesis puede considerarse factible si dividimos la chimenea solar en pequeños trozos infinitesimales, de manera que la temperatura en la superficie del canal sea la misma en toda ella.

De esta manera, se analiza el intercambio energético convectivo que ocurre en la cámara de aire de la chimenea solar, canal comprendido entre el muro absorbedor y la superficie acristalada, quedando el problema a resolver como sigue:

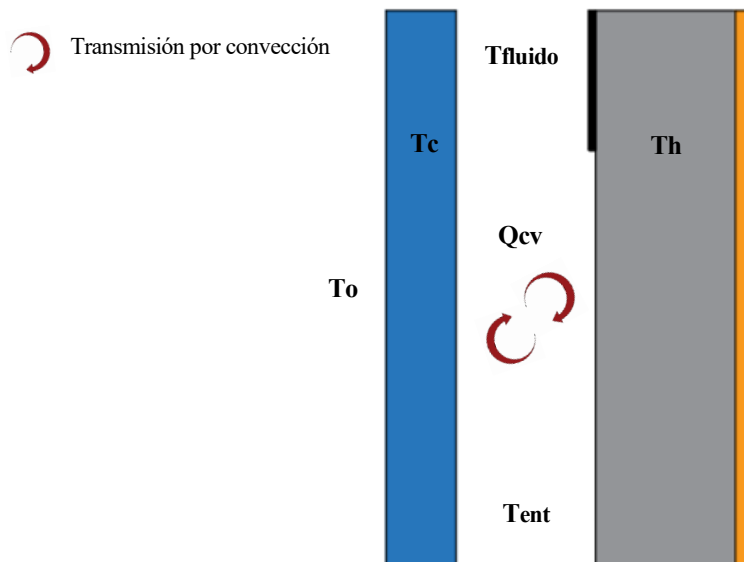


Figura 24. Intercambio convectivo en el canal de la chimenea [Elaboración propia]

Siendo:

- $T_o$  la temperatura exterior
- $T_c$  la temperatura de la superficie acristalada
- $T_h$  la temperatura del muro absorbedor
- $Q_{cv}$  la energía intercambiada en el proceso convectivo

Las variables principales que definen el problema fluidomecánico son [13]:

Excitaciones de temperatura  
( $T_o$ ,  $T_c$ ,  $T_h$ )

Coefficientes convectivos ( $h$ )

Flujo másico de aire ( $q$ )

Como se ha comentado anteriormente, la eficacia de la chimenea solar dependerá de la cantidad de calor procedente de la radiación solar que sea capaz de absorber. Cuanto mayor sea el calor absorbido, mayor será la temperatura de las superficies, mayor será la diferencia de presiones y el intercambio convectivo, y por lo tanto será mayor el tiro generado y el caudal de aire que atraviese el canal.

$$\text{Área de captación} \uparrow \rightarrow \text{Calor absorbido} \uparrow \rightarrow \Delta \text{Temperatura} \uparrow \rightarrow \text{Caudal de aire} \uparrow$$

Con esto se consigue aumentar el área de captación solar con unas mismas medidas globales del sistema e incrementar el almacenamiento térmico aprovechando además la inercia térmica de las aletas, consiguiendo así una mejora en la transferencia de calor y del caudal de aire intercambiado

Interesará entonces aumentar el área de la superficie que reciba la radiación, desencadenando así el proceso que acaba de comentarse [26]. Una primera idea puede ser aumentar el área de captación incrementando el área de la superficie cristalina y del muro absorbedor. Sin embargo, esto supondría un aumento importante en área y volumen del sistema (espacio que debe estar disponible para instalar la chimenea), además de un incremento considerable en el coste de fabricación. Es por esto que se propone un diseño innovador de chimenea solar, que consigue aumentar la superficie de captación sin incrementar las medidas principales (anchura, altura y profundidad). Esto se consigue incorporando aletas al interior del canal, subdividiendo la cámara de aire en varios compartimentos, obteniendo así un conjunto de 'n' canales unidos por las aletas.

Para comprender mejor lo comentado se muestran las siguientes figuras, donde se muestra la diferencia de áreas resultantes aumentando la superficie de captación de las dos formas que se menciona:

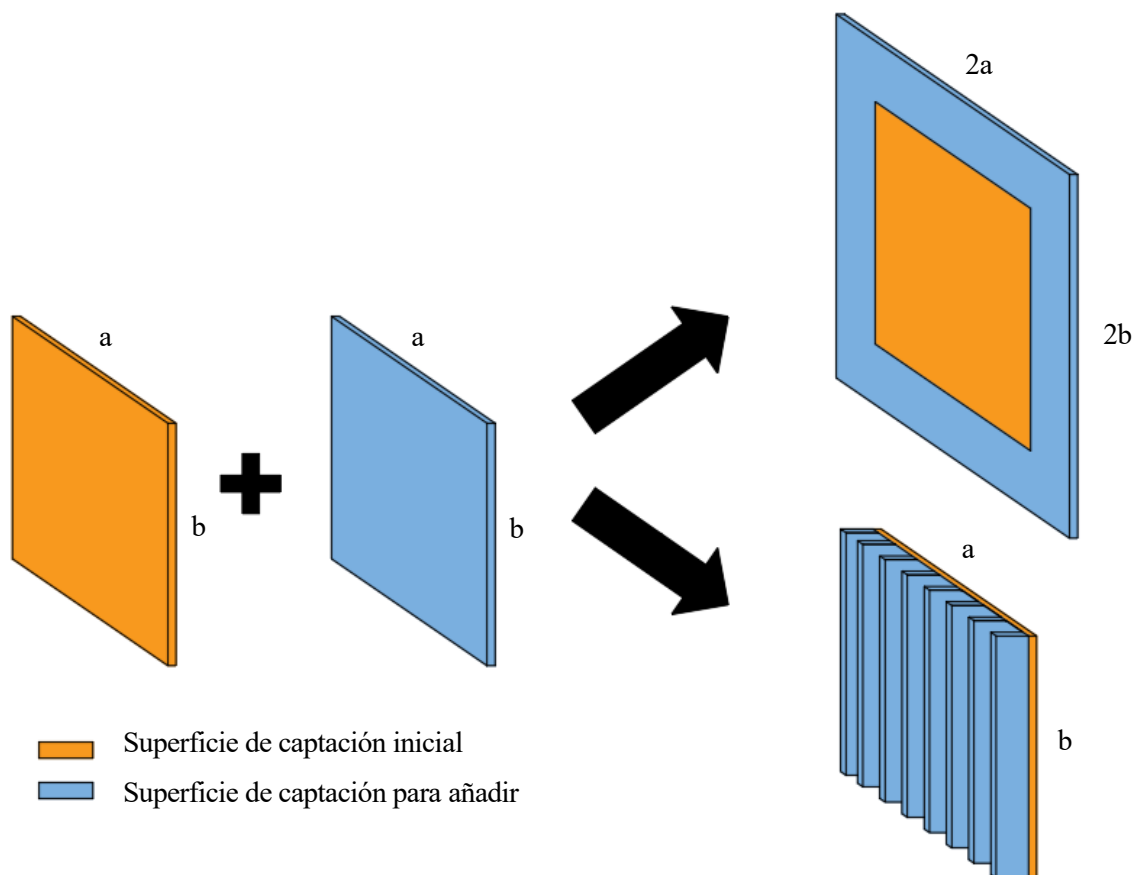


Figura 25. Aumento de superficie de captación con y sin aletas [Elaboración propia]

Se comprueba cómo se consigue la aumentar la superficie de captación con las mismas medidas principales que al principio.

Este diseño permite almacenar calor durante las horas diurnas gracias a la captación solar que recibe y acumula el muro absorbedor, mientras que por la noche el calor acumulado provoca la ventilación pasiva. Gracias a esta ventilación pasiva se elimina el factor de doble flujo (sistema en el que se produce una aportación y una extracción de aire de manera mecánica) junto con las pérdidas de carga que este trae consigo.

En los siguientes apartados se va a comprobar la validez del sistema, haciendo especial interés en el funcionamiento nocturno, principal razón de ser de la chimenea solar. Una vez comprobada la eficacia de la solución, se buscarán la geometría óptima del sistema, a partir de la cual se realizará un estudio que permita su industrialización.

## 3.2 Funcionamiento fluidomecánico del modelo permanente

### 3.2.1 Geometría del sistema

El modelo se realizará para un solo canal, siendo este extrapolado a continuación al sistema completo. Los valores iniciales mostrados son los valores típicos encontrados en la literatura [13], estableciendo además un espesor  $e$  de 2 cm y siendo 10 el número de aletas inicial.

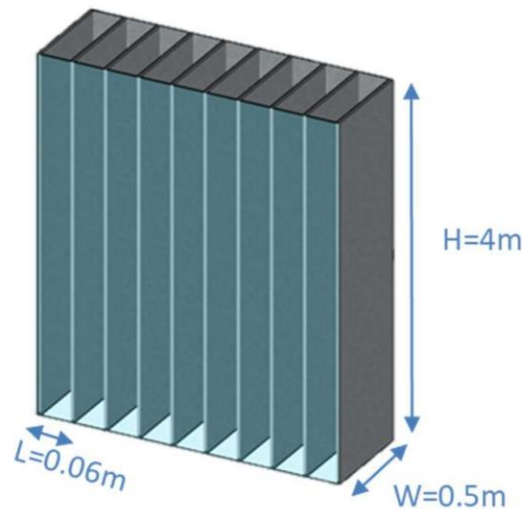


Figura 26. Geometría de la chimenea propuesta [13]

Con esto se empieza a introducir nomenclatura que será utilizada en algunas expresiones necesarias en el cálculo.

El área de transferencia de cada canal  $A_{conducto}$  se define como como el producto de altura  $H$  por profundidad  $W$  para cada cara del canal.

$$A_{conducto} = 2HW$$

De la misma forma puede definirse el radio hidráulico, mediante la expresión:

$$D_h = \frac{4LW}{2(L + W)}$$

### 3.2.2 Propiedades del aire

Todas las propiedades empleadas en el modelo serán evaluadas a la temperatura del fluido, por lo que interesará en primera instancia calcularla u obtener una expresión que permita su cálculo.

La temperatura del aire  $T_{fluido}$  se definirá como la media entre la temperatura de entrada al canal  $T_{ent}$  y la temperatura de salida  $T_{sal}$ , que dependerá del intercambio convectivo realizado. De esta forma se define:

$$T_{fluido} = \frac{T_{ent} + T_{sal}}{2}$$



Es a esta temperatura a la que se evalúan las distintas variables que intervienen en el análisis fluidomecánico: el calor específico del fluido  $c_{p\ aire}$ , el coeficiente de dilatación térmica  $\beta$ , la viscosidad cinemática  $\nu$ , la difusividad térmica  $\alpha$  y la conductividad del fluido  $K$ .

Por otro lado, el caudal de aire que atraviesa el canal puede calcularse como:

$$q_{aire} = vLW\rho_{aire}$$

Siendo  $v$  la velocidad del aire y  $\rho_{aire}$  la densidad del aire, a la temperatura media del fluido.

En cuanto a la densidad, las densidades a la entrada y media del canal se obtienen de las expresiones:

$$\rho_{ent} = \frac{Mp_{atm}}{RT_{ent}}; \rho_{media} = \frac{Mp_{atm}}{RT_{fluido}}$$

Siendo  $M$  la masa molecular del aire,  $p_{atm}$  la presión atmosférica y  $R$  la constante universal de los gases.

Para realizar el cálculo de la diferencia de presiones o tiro generado, deber emplearse la densidad media en lugar de la densidad de salida, quedando la ecuación de la diferencia de presiones como sigue:

$$\Delta P = (\rho_{ent} - \rho_{media})gH$$

### 3.2.3 Pérdidas de carga

En todo intercambio convectivo se produce una pérdida de carga, que afecta en mayor o menor medida a la velocidad del fluido en el canal. Así, pueden definirse unos coeficientes de carga a la entrada  $K_{ent}$  y a la salida  $K_{sal}$ , cuyos valores numéricos generan controversia entre distintos autores.

Doña Teresa Palomo realizó una síntesis de estos valores en su estudio [13], que se muestra a continuación:

Autor	$K_{ent}$	$K_{sal}$	$K_{total}$
Duffie [24]	-	-	$8\left(\frac{w}{e}\right)^2 + 2$
Chan [24]	$1,25\left(\frac{w}{e}\right)^2$	$\left(\frac{w}{s}\right)^2$	$1,25\left(\frac{w}{e}\right)^2 + \left(\frac{w}{s}\right)^2$
Erell [24]	$1,5\left(\frac{w}{e}\right)^2$	0	$1,5\left(\frac{w}{e}\right)^2$
Sandberg, Moshegh [26]	1,5	1	2.5
Anfonso, Oliveira [26]	-	-	3

Tabla 6. Valores del coeficiente de pérdidas [13]

Siendo  $w$  la profundidad del canal,  $e$  la distancia del orificio de entrada y  $s$  la distancia del orificio de salida. Se comprueba que la mayoría coinciden en que los coeficientes de pérdidas dependen del cuadrado de la relación entre estas magnitudes, y que las pérdidas a la entrada son mayores que las pérdidas a la salida ( $K_{ent} > K_{sal}$ ).

Los coeficientes de pérdidas afectan al cálculo de la velocidad del fluido. En el siguiente apartado se muestran dos expresiones en principio válidas para este cálculo. Una de ellas supone los coeficientes de pérdidas nulas, pero para la segunda sí se precisan estos valores. Para esta expresión se tomarán como resultados obtenidos por Sandberg y Moshegh, ya que hacen referencia a un canal rectangular con orificios a la entrada y a la salida (como este caso).

Por último, el factor de fricción  $f$  se estima a partir de las expresiones derivadas del diagrama de Moody, dependiendo de si el fluido (el aire que atraviesa el canal) se encuentra en régimen laminar o turbulento. Para el caso estudiado, se establece la función relativa al régimen turbulento como la indicada, estimándose el factor de fricción como:

$$\left(\frac{1}{f}\right)^{0,5} = -2 \log_{10} \left( \frac{2,51}{Re\sqrt{f}} \right)$$

### 3.2.4 Cálculo de la velocidad

El estudio al que se hace referencia muestra dos opciones a la hora de calcular la velocidad del fluido a través del canal.

La primera opción consiste en una estimación de la velocidad en un sistema sometido a convección natural, basada en el estudio realizado en la Tesis Doctoral “Ahorro Energético mediante el uso de elementos de doble envolvente transparente-opaco”, tutorizada por Servando Álvarez Domínguez [27]. Como se ha comentado anteriormente, en esta hipótesis se consideran despreciables los coeficientes de pérdidas de carga a la entrada y a la salida, resultando la ecuación:

$$v_1 = \sqrt{\frac{2g\rho_{ent}H}{\frac{H}{2L}f\rho_{media}} \frac{T_{fluido} - T_{ent}}{T_{fluido}}}$$

La segunda opción para el cálculo de la velocidad del fluido se obtiene a partir de una revisión de la literatura relativa al modelado de chimeneas solares. Sankonidou [28] establece una expresión cercana a la definida en la opción 1:

$$v_2 = \sqrt{\frac{2g\rho_{ent}H}{f\frac{H}{D_h} + K_{ent} + K_{sal}} \frac{\rho_{ent} - \rho_{media}}{\rho_{media}}}$$

El estudio realizado analiza un total de cuatro casos en los cuales se calculará la velocidad en el modelo permanente mediante distintos métodos, variando entre los distintos parámetros que se han ido mostrando en apartados anteriores.

Así, los casos varían en función de la ecuación de la velocidad utilizada (opción 1 u opción 2), el añadir o no los coeficientes de pérdidas, y considerando también la velocidad que resultaría de forzar la diferencia entre el tiro generado por diferencia de densidades y el obtenido como suma de componentes, a un valor nulo.

Los resultados obtenidos se recogen en la siguiente tabla:

Parámetros de cálculo			Resultados	
Método	Velocidad	$K_{ent}; K_{sal}$	$\Delta P - \Delta P_{suma}$	Velocidad generada
1	$v_1$	0	-3,35	2,36
2	$v_2$	1,5; 0	-0,079	0,62
3	$v_2$	0	3,31E-9	0,87
4	$\Delta P - \Delta P_{suma} = 0$	1,5; 0	0	0,603

Tabla 7. Resultados del cálculo de la velocidad [13]

Analizando los resultados puede observarse cómo la velocidad obtenida y la diferencia entre las pérdidas de presión en el método 1 difieren bastante del resto de métodos. Esto unido a que la velocidad obtenida es mayor a la esperada sugiere que este método quede descartado.

La razón de este valor tan elevado puede deberse al no haber tenido en cuenta los coeficientes de pérdida de carga en la ecuación.

Sin embargo, la velocidad obtenida en el método 2 considerando las pérdidas de carga se asemeja mucho a la obtenida forzando la diferencia de pérdidas de presión a un valor nulo, por lo que de aquí en adelante se considerará como válido este último método para el cálculo de la velocidad del fluido.

A modo de resumen para los siguientes apartados, se muestra la siguiente tabla con las premisas que se han tomado en el modelado de la chimenea:

Campo de estudio	Magnitud	Valor
Geometría	Altura (H)	4 m
	Profundidad (W)	0,5 m
	Ancho de las aletas (L)	0,06 m
	Espesor de las aletas (e)	0,02 m
	Número inicial de aletas	10
Propiedades del aire	Temperatura de entrada ( $T_{ent}$ )	25 °C
	Temperatura a la salida ( $T_{fluido}$ )	Objetivo del estudio
	Factor de fricción ( $f$ )	En régimen turbulento
	Densidad media del fluido ( $\rho_{media}$ )	
Pérdidas de carga	Coefficiente de pérdidas a la entrada ( $K_{ent}$ )	1,5
	Coefficiente de pérdidas a la salida ( $K_{sal}$ )	1

Tabla 8. Parámetros de cálculo del sistema

Finalmente, la velocidad se calcula como aquella que se produce al forzar a cero la diferencia de caída de presión calculada como diferencia de densidades y como suma de sus componentes.

### 3.3 Análisis térmico en régimen nocturno

Como ya se sabe, durante las horas diurnas el muro absorbedor (que posee una gran inercia térmica) va recibiendo la radiación solar, aumentando así su temperatura. Durante la noche, esta superficie acumuladora es la que favorece el intercambio convectivo entre esta y el aire.

En este apartado se estudia la transmisión de calor entre el hormigón del muro absorbedor y el aire contenido en el canal. El modelo térmico se calcula a través de la Diferencia de Temperatura Logarítmica Media (DTLM), que nos permitirá obtener el calor transferido entre los cuerpos:

Por un lado, el calor transferido por el hormigón ( $Q_h$ ) puede calcularse como:

$$Q_h = m_h c_{ph} (T_{hi} - T_{hf}) \frac{1000}{3600}$$

Siendo:

- $m_h$ : masa del hormigón (kg)
- $c_{ph}$ : calor específico del hormigón (kJ/kgK)
- $T_{hi}$ : temperatura inicial del hormigón (°C)
- $T_{hf}$ : temperatura final del hormigón (°C)

El calor transferido al aire ( $Q_{aire}$ ) viene dado por la expresión:

$$Q_{aire} = q_{aire} c_{paire} (T_{fluido} - T_{ent}) 1000$$

Siendo:

- $q_{aire}$ : caudal de aire (kg/s)

- $c_{\text{aire}}$ : calor específico del aire (kJ/kgK)

Mediante el DTLM se obtiene la ecuación que permite calcular el calor transferido por convección entre el aire y el hormigón ( $Q_{cv}$ ):

$$Q_{cv} = Ah_c DTLM$$

$$DTLM = \frac{\Delta T_{ent} - \Delta T_{sal}}{\ln \frac{\Delta T_{ent}}{\Delta T_{sal}}}$$

$$\Delta T_{ent} = T_{hi} - T_{ent}$$

$$\Delta T_{sal} = T_{hs} - T_{fluido}$$

Siendo:

- $A$ : área de transferencia (m<sup>2</sup>)
- $h_c$ : coeficiente de película convectivo (W/m<sup>2</sup>K)
- $DTLM$ : Diferencia de Temperatura Logarítmica Media
- $\Delta T_{ent}$ : incremento de temperatura a la entrada (°C)
- $\Delta T_{sal}$ : incremento de temperatura a la salida (°C)

Considerando un proceso adiabático en el que no se producen pérdidas de calor, el calor que cede el hormigón es el mismo que el calor ganado por el aire, es decir:

$$Q_h = Q_{\text{aire}} = Q_{cv}$$

Resolviendo esta ecuación se obtienen los siguientes resultados en régimen nocturno [13]:

Datos	Valores
Área (m <sup>2</sup> )	4
Número de aletas	10
Masa del hormigón (kg)	100
Temperatura de entrada del aire (°C)	25
Temperatura inicial del hormigón (°C)	60

Tabla 9. Datos de entrada para el modelo en régimen nocturno

Resultados	Valores
Tiro generado (Pa)	0,645
Caudal de aire (kg/s)	0,030
Calor intercambiado (W)	259,1
Temperatura de salida del aire (°C)	33,38
Temperatura final del hormigón (°C)	49,4
Velocidad del aire (m/s)	0.876

Tabla 10. Resultados obtenidos para el modelo en régimen nocturno

### 3.4 Optimización de las dimensiones

En este apartado se realiza un análisis dimensional de la geometría de la chimenea solar, que permite conocer el ancho entre aletas y por tanto el número de aletas óptimos. Ya que el aumento de temperatura en la cámara se debe a la radiación solar que incide sobre ella, la solución óptima será aquella que maximice la radiación absorbida por las lamas.

Para dicho análisis se utiliza una herramienta desarrollada por el grupo Termotecnia, que recibiendo unos datos de entrada de tipo geométrico (lamas verticales u horizontales, separación, espesor, ancho... y la posición solar para el día o días que se analizan, permiten obtener la geometría óptima del sistema.

Después de realizar el análisis se llega a la conclusión de que la geometría que maximiza tanto los valores de calor absorbido integrados y picos del día es la que se indica a continuación:

Magnitudes	Valores óptimos
Ancho (W)	0,6 m
Altura (H)	5 m
Separación entre lamas (L)	0,08 m
Número de lamas	10
Número de canales	9 m

Tabla 11. Valores óptimos de geometría de una chimenea solar [\[13\]](#)

Con esta geometría, la radiación total absorbida integrada a lo largo del día es 20,17 kW/m, siendo el valor máximo horario 2,79 kW/m.

# 4 INDUSTRIALIZACIÓN DEL SISTEMA

---

## 4.1 Propiedades óptimas del modelo

En apartados anteriores se ha realizado un estudio exhaustivo que ha permitido obtener de manera teórica un modelo de chimenea solar optimizado. Pero la realidad es que en muchas ocasiones no es posible encontrar un producto que se adecúe a los parámetros requeridos.

Considerando que la chimenea solar del presente estudio se encuentra en un nivel relativamente avanzado de madurez de tecnología, el siguiente reto que afrontar es industrializar el producto. Por supuesto, el objetivo primordial de esta fase es obtener un modelo que cumpla el mayor número de los requisitos obtenidos de manera teórica, pero para llegar a un producto comercializable es necesario tener en cuenta factores como la viabilidad en la fabricación o los costes derivados del propio material, fabricación y transporte.

A continuación, volverán a presentarse los componentes que conforman la chimenea solar que se estudia, esta vez poniendo el foco en las principales propiedades que deben cumplir, para poder realizar a continuación una búsqueda coherente de componentes entre empresas que puedan proporcionarlos.

### 4.1.1 Acristalamiento

El acristalamiento de una chimenea solar es una parte crucial del diseño, ya que permite capturar y aprovechar la energía solar de manera eficiente. El acristalamiento se utiliza para crear una cubierta transparente alrededor de la chimenea solar, que ayuda a atrapar y retener el calor generado por la radiación solar.

Se busca un acristalamiento que durante el régimen diurno deje pasar la mayor cantidad de radiación posible, y que por el contrario no permita que vuelva a salir al exterior. Esto último cobra mayor importancia durante el régimen nocturno, en el cual la pérdida del calor que proporciona el muro absorbedor a través del acristalamiento supondría una rápida caída en el rendimiento de la chimenea.

En cuanto al material utilizado, el acristalamiento de una chimenea solar generalmente está compuesto de vidrio templado o vidrio de alta resistencia al calor (refractarios). Estos tipos de vidrio pueden soportar las altas temperaturas generadas dentro de la chimenea solar sin deformarse ni romperse. Es necesario que el vidrio seleccionado sea capaz de soportar la temperatura máxima alcanzada en la chimenea, que se dará en el momento en el que el muro absorbedor llegue a su máxima temperatura. Se necesita por tanto un vidrio refractario, capaz de resistir sin reblandecerse ni fundirse frente a altas temperaturas. Esta resistencia al reblandecimiento también se denomina resistencia pirosópica [\[32\]](#).

Además, al ser el acristalamiento la parte externa de la chimenea y siendo la colocación de la chimenea en la fachada del edificio, el acristalamiento se encontrará totalmente expuesto a condiciones climatológicas adversas y a diversas acciones como impactos o actos vandálicos.

El vidrio utilizado también debe ser transparente a la radiación solar para permitir que esta pase a través de él. Esto permite que la radiación solar caliente el interior de la chimenea solar y genere la corriente ascendente de aire caliente. En general, cuanto mayor sea el grado de transparencia del acristalamiento mayor será la radiación solar que lo atraviese.

Otro factor que influye en el paso de la radiación solar es el espesor del acristalamiento: cuanto menor sea el espesor de este, mayor será el porcentaje de radiación que lo atraviese.

Es importante además que el acristalamiento esté herméticamente sellado para evitar fugas de aire y minimizar las pérdidas de calor. Esto se logra mediante el uso de juntas y selladores adecuados para asegurar que no haya infiltraciones de aire no deseadas. Es lógico pensar que cuanto menor sea el número de juntas necesarias, menores serán las pérdidas por estas. Por ello en la medida de lo posible se intentará obtener un solo acristalamiento en su totalidad, formado por una sola pieza, de manera que estas pérdidas se minimicen, aunque también es importante considerar que las juntas servirán también para soportar los esfuerzos debidos a la dilatación del vidrio con la temperatura.

Por otro lado, para mejorar aún más la eficiencia de la chimenea solar, algunos diseños pueden incluir vidrios de doble y triple panel o vidrios de baja emisividad. Estos vidrios proporcionan un mayor aislamiento térmico al reducir la transferencia de calor entre el interior y el exterior de la chimenea solar. Esto entra en conflicto con el espesor de la chimenea, pues obviamente un mayor número de paneles implica un mayor espesor. Será importante entonces conocer la eficiencia de la solución de mano del fabricante o bien comprobarla experimentalmente.

En resumen, el vidrio utilizado en una chimenea solar:

- Debe permitir el paso de la radiación solar a través de él sin una reducción significativa. Se busca un vidrio transparente que permita que la mayor cantidad posible de luz solar ingrese al interior de la chimenea solar. El acristalamiento debe tener por tanto una alta transmisividad.
- Tienen que poseer una baja capacidad de absorción de calor. Esto significa que el vidrio no debe absorber una gran cantidad de energía solar y convertirla en calor.
- El vidrio estará expuesto a altas temperaturas generadas dentro de la chimenea solar, debe ser capaz de resistir el calor sin deformarse, agrietarse o romperse. Por lo tanto, se requiere un vidrio resistente al calor que pueda soportar las condiciones de funcionamiento de la chimenea solar.
- Es necesario que el vidrio tenga baja emisividad, lo que significa que no emita una gran cantidad de calor generado dentro de la chimenea al ambiente exterior. Esto ayuda a mantener la eficiencia térmica del sistema.
- Es deseable que se trate de un vidrio templado, capaz de soportar las condiciones climatológicas adversas e impactos.
- Por último, también sería deseable que el vidrio tuviera el menor peso posible, ya que este influirá en menor o mayor medida en su transporte e implantación en el edificio, además de los esfuerzos que dicho peso provocará sobre la edificación.

Propiedades del acristalamiento					
Elevada transmisibilidad	Baja absorptividad	Elevada resistencia al calor	Baja emisividad	Elevada resistencia a impactos	Bajo peso

Tabla 12. Propiedades óptimas del acristalamiento

#### 4.1.2 Muro absorbedor

En una chimenea solar, el muro absorbedor, también conocido como panel absorbedor o receptor solar, es una parte crucial del sistema que se encarga de capturar y absorber la radiación solar que ha atravesado el acristalamiento, para posteriormente generar calor durante el régimen nocturno.

Se busca un material que durante el régimen diurno sea capaz de absorber y retener la mayor cantidad de radiación solar posible, para que durante el régimen nocturno sea este el que provoque el intercambio de calor y con ello el flujo de aire.

Las propiedades deseadas del muro absorbedor incluyen:

- Alta absorción de radiación solar: el muro absorbedor debe ser capaz de capturar la mayor cantidad posible de radiación solar incidente. Para lograrlo, se busca que tenga una alta capacidad de absorción de luz solar, preferentemente en la gama de longitudes de onda en las que la radiación solar es más intensa. Esto último se consigue con tonalidades oscuras como el negro, por lo que lo más común será que el muro absorbedor esté recubierto de una pintura de este color.
- Baja reflectividad: el muro absorbedor debe tener una baja reflectividad para evitar que la radiación solar se refleje y se pierda en lugar de ser absorbida. Se busca que el muro absorbedor sea capaz de retener la mayor cantidad de radiación solar posible, de manera que se alcance la mayor temperatura posible y tener un mejor rendimiento durante el régimen nocturno, prolongando además su tiempo de uso.

- Buena conductividad térmica: el muro absorbedor debe ser capaz de conducir eficientemente el calor generado por la absorción de la radiación solar hacia el medio de transferencia de calor en la chimenea solar, en este caso al aire.
- Resistencia a altas temperaturas: dado que el objetivo es que el muro absorbedor esté expuesto a altas temperaturas debido a la absorción de la radiación solar, este debe ser capaz de soportar estas condiciones sin deformarse ni deteriorarse. Se busca un material resistente al calor que pueda mantener su integridad estructural a temperaturas elevadas. Para ello se pueden añadir al hormigón materiales refractarios arcillosos. Las arcillas refractarias son silicatos de Aluminio hidratados, que se utilizan para la fabricación de ladrillos refractarios mezclados con una materia inerte, en este caso el propio hormigón [32]. Las características de los materiales que más interesan en este estudio son:
  - Han de resistir sin reblandecimiento apreciable temperaturas lo más elevadas posibles.
  - Han de resistir también choques térmicos, es decir, variaciones bruscas de temperaturas (aunque en el caso de la chimenea solar la temperatura irá aumentando y disminuyendo de manera progresiva).
  - Las variaciones de dimensiones que los materiales refractarios adquieren permanentemente en su utilización deben ser lo más reducidas posibles, para evitar dislocaciones o excesiva apertura de juntas en los revestimientos. Esto es un punto que debe tenerse especialmente en cuenta en el caso de estudio: la manera de ejecutar la unión entre el acristalamiento y el muro absorbedor, junto con la reflexión de que es posible que, al estar sometidos a grandes variaciones de calor, será necesaria la presencia de juntas de dilatación en el prototipo construido.
- Elevada inercia térmica: la inercia térmica se refiere a la capacidad de un material para absorber calor cuando se calienta y liberarlo gradualmente cuando se enfría, lo que ayuda a regular las fluctuaciones de temperatura en un entorno. Esta es una propiedad primordial del muro absorbedor es que este sea capaz de acumular y retener el calor absorbido durante el mayor tiempo posible, para prolongar así el funcionamiento en régimen nocturno.

Propiedades del muro absorbedor				
Elevada absorción	Baja reflectividad	Elevada conductividad térmica	Elevada resistencia al calor	Elevada inercia térmica

Tabla 13. Propiedades óptimas del muro absorbedor

Entrando un poco en detalle, la inercia térmica se define como la propiedad que indica la cantidad de calor que puede conservar un cuerpo y la velocidad con que este la cede o absorbe del entorno. No se trata de una magnitud física en sí misma, sino que depende de la masa o densidad, del calor específico, del coeficiente de conductividad térmica del material y de la geometría del cuerpo (espesor). En apartados posteriores se comprobará la influencia que tienen estos parámetros en la eficiencia del muro absorbedor y de la chimenea en su conjunto.

Los elementos con inercia térmica absorben y ceden el calor lentamente, lo que genera un retardo (o desfase) del ingreso de la temperatura exterior al interior y viceversa, y también una atenuación (o amortiguamiento) de las amplitudes de las temperaturas extremas. Este efecto permite que los edificios permanezcan más tiempo en la zona de confort sin necesidad de gastos energéticos adicionales, siendo este el objetivo primordial de la chimenea solar.

Algunos de los materiales más utilizados como superficies acumuladoras son los metales, que poseen una elevada conductividad térmica. El acero, el Aluminio y el Cobre son algunos de los materiales más utilizados, gracias a su capacidad para conducir y transferir el calor. El problema es que estos materiales no poseen una de las propiedades principales que se requieren: la inercia térmica; no son capaces de permanecer mucho tiempo a las temperaturas que requiere el régimen nocturno, mientras que los materiales con elevado calor específico se pueden utilizar ventajosamente para conservar energía calorífica. Esto hace que entre en juego un material que sí cumple con este último requisito, y que será el material principal empleado en este estudio: el hormigón.

El hormigón es un material denso y con alta masa térmica, lo que le confiere una buena capacidad de almacenamiento de calor. Cuando se expone a una fuente de calor durante el régimen diurno, como la radiación



solar directa, el hormigón absorberá lentamente el calor y lo almacenará en su masa. A medida que la temperatura ambiente disminuye, durante el régimen nocturno el hormigón liberará gradualmente ese calor almacenado, ayudando a mantener una temperatura más estable y reduciendo los cambios bruscos de temperatura en un espacio. De esta forma el intercambio de calor con el aire de la cámara permanecerá durante más tiempo, garantizando el funcionamiento de la chimenea solar por un período más prolongado.

Además, desde el punto de vista de fabricación y mantenimiento, el hormigón presenta algunas ventajas respecto a otros materiales:

- Es un material de construcción con un bajo coste comparado con otros materiales de construcción similares, como el acero. Esto se debe a que los materiales que lo conforman son bastante comunes y abundantes, por lo que conseguirlos no es complicado.
- Es moldeable, capaz de adaptarse a diferentes geometrías.
- Es un material aislante tanto en temperaturas bajas como temperaturas altas, es por ello que se utiliza en interiores como sustituto de mecanismos de calefacción o refrigeración, y es por ello que es el material seleccionado para conformar el muro absorbedor.
- Larga durabilidad, ya que una vez instalado puede permanecer años sin grandes perjuicios, además de que ser resistente a distintas condiciones como puede ser la abrasión, humedad, lluvia o temperaturas extremas.
- Material resistente al fuego, capaz de resistir por tiempo extenso altas temperaturas sin mostrar ninguna alteración en su superficie gracias a su resistencia. Esta cualidad no está directamente relacionada con el funcionamiento térmico de la chimenea solar, pero es una cualidad ventajosa que desde luego hay que tener en cuenta a la hora de industrializar el producto.
- La resistencia y dureza este material le otorga una elevada capacidad para evitar deformaciones o alteraciones en su forma, siendo por tanto resistente a impactos externos
- Mínimo mantenimiento, ya que con el paso de los años no sufre ningún cambio o alteración. Además, al presentar una superficie lisa en este caso, los períodos entre limpiezas pueden ser mayores.

Se observa así que el muro absorbedor es un componente fundamental en la chimenea solar. Por esto, es común utilizar un hormigón de alta densidad y alta conductividad térmica para maximizar la capacidad de absorción y transferencia de calor. Esto se consigue añadiendo algunos aditivos que mejoren las propiedades explicadas anteriormente, como su conductividad térmica. Uno de los retos a los que se enfrenta el siguiente apartado es encontrar el hormigón que mejor se adapte a los requisitos anteriormente enunciados.

El uso de materiales refractarios como cerámicas aumentan la inercia térmica del muro, de manera que pueda ser interesante conformar el muro de hormigón con una primera capa oscura de mayor transmisibilidad externa (de esta forma el muro empieza a calentarse desde las primeras horas del día) y una capa interior con un añadido de material refractario que provoque el aumento de la inercia térmica, prolongando así el funcionamiento de la chimenea solar. De esta forma se obtendría un muro absorbedor con cierto grado de “inteligencia”.

A la hora de industrializar esta superficie acumuladora, se acudirán a prefabricados de hormigón. Un producto prefabricado de hormigón es un producto hecho de hormigón y fabricado de acuerdo con una norma de producto específica, en un lugar distinto de su localización final de uso, protegido de las condiciones ambientales adversas durante la fabricación y que es el resultado de un proceso industrial bajo un sistema de control de producción en fábrica, y con la posibilidad de acortar los tiempos de entrega [\[33\]](#).

Esta es la tendencia actual en la Industria, debido a diversos beneficios como:

- Su flexibilidad a la hora de realizar diferentes diseños.
- Disminución de costes de fabricación y disminución de materia prima necesaria.
- Mismo proceso de fabricación para todas las piezas.
- Mayor calidad en acabado y propiedades, al estar sometidos a mayores controles de calidad.
- Fácil instalación en el emplazamiento en cuestión.

Todo esto deriva además en una muy importante componente medioambiental. Entre otros factores, al necesitar menos materia prima se consigue una mejora en el impacto ambiental del producto, mejorando así el Análisis de Ciclo de Vida (ACV) de este.

Como normativa de referencia se establece la UNE-EN 14992:2008+A1:2012: *Productos prefabricados de hormigón. Elementos para muros*. Esta norma europea aplica a los muros prefabricados de hormigón normal o aligerado con estructura densa en varios puntos, entre los que se encuentran el aislamiento térmico y las aplicaciones en fachadas.

En esta norma se establecen además tolerancias respecto a magnitudes como la medida o la planicidad de la pieza de hormigón prefabricado producida, valores que pueden servir como referencia cuando se lleve el presente estudio a su fase de fabricación [34].

Clase	Desviación admisible				
	Medidas de referencia				
	0 m – 0,5 m	0,5 m – 3 m	> 3 m – 6 m	> 6 m – 10 m	> 10 m
A	± 3 mm <sup>a</sup>	± 5 mm <sup>a</sup>	± 6 mm	± 8 mm	± 10 mm
B	± 8 mm	± 14 mm	± 16 mm	± 18 mm	± 20 mm

<sup>a</sup> ± 2 mm en el caso de aplacados pequeños.

Tabla 14. Norma UNE-EN 14992:2008+A1:2012, tabla 2 - Tolerancias de medidas

Clase	Galgas con distancias entre puntos de medida hasta	
	0,2 m	3 m
A	2 mm	5 mm
B	4 mm	10 mm

Tabla 15. Norma UNE-EN 14992:2008+A1:2012, tabla 3 - Tolerancias respecto a la planicidad de las superficies

Si no se indica lo contrario, normalmente la clase A se aplica a superficies prefabricadas en molde y la clase B a otro tipo de superficies.

Como garantía de calidad de cualquier producto fabricado en la Unión Europea, será necesaria la declaración de las propiedades del producto, declarándose propiedades como la resistencia a compresión, coeficientes de seguridad, aislamiento térmico o geometría.


 0123
Compañía, dirección  12  0123-CPD-0456
EN 14992:2007+A1:2012  Elementos para muros  <b>ELEMENTO PARA MURO PORTANTE  CON/SIN APLICACIÓN DE FACHADA</b>  Hormigón: Resistencia a compresión ..... $f_{ck} = xx \text{ N/mm}^2$  Acero de armar: Resistencia última a tracción ..... $f_{tk} = yyy \text{ N/mm}^2$ Límite elástico ..... $f_{yk} = zzz \text{ N/mm}^2$  Acero de pretensar: Resistencia última a tracción ..... $f_{pk} = uuu \text{ N/mm}^2$ Límite elástico convencional a tracción al 0,1% ..... $f_{p0,1k} = www \text{ N/mm}^2$  Resistencia mecánica (valores de proyecto): Resistencia a la compresión axial ..... nnn kN Capacidad a momento flector (de la sección media) ..... mmm kNm Capacidad a cortante (de las secciones finales) .. vvv kN  Coeficientes de seguridad de los materiales aplicados en el cálculo de la resistencia: Para el hormigón ..... $\gamma_c = z.zz$ Para el acero ..... $\gamma_s = x.xx$ Resistencia al fuego R ..... RXX para $\eta_{fi} = 0.xx$ ..... RYY para $\eta_{fi} = 0.yy$  Para la geometría, clases de tolerancia, detalles construc- tivos, durabilidad, parámetros de aislamiento acústico, parámetros de aislamiento térmico, posible información complementaria sobre la resistencia al fuego y otros PDN, véase la documentación técnica  Resistencia térmica $R_c = xxx \text{ m}^2\text{K/W}$  Documentación técnica: Número de identificación ..... xxxxxx

Tabla 16. Ejemplo de marcado CE [33]

Para la chimenea solar objeto de estudio, el diseño del flujo de aire es importante para asegurar una transferencia de calor eficiente. Para ello se añaden las aletas de hormigón al muro, aletas que como ya se ha visto anteriormente aumentan el área de transferencia de calor hacia la cámara de aire. Por lo tanto, será necesario encontrar fabricantes capaces de construir el modelo requerido, con una geometría que deja de ser un simple prisma rectangular, si no que comienza a ser un poco más compleja. En los planos anexo a este documento se

presentan las características dimensionales de los componentes de la chimenea solar, incluyendo este muro absorbedor con las aletas.

### 4.1.3 Componentes adicionales

Dado que el muro absorbedor estará en contacto con el edificio, puede suceder que se produzca el efecto indeseable de que este transfiera el calor también hacia dentro del edificio (algo totalmente contrario a lo que se busca). Por ello, se pueden utilizar materiales aislantes, como espumas o paneles aislantes, colocados entre el muro absorbedor y el edificio, para reducir las pérdidas térmicas y mejorar la eficiencia del sistema. No obstante, en primera instancia se considerará que la propia fachada del edificio, ya situada entre la superficie acumuladora y el interior, realiza las veces de aislador, por lo que no se considerará a no ser que sea necesaria su aplicación.

Esta necesidad se hará patente durante la etapa de verificación de las propiedades del prototipo.

Además del acristalamiento y el muro absorbedor, también será necesario contar con un sistema de compuertas de entrada y salida de aire, accionadas por algún sistema de control, al igual que algún sistema de ventilación mecánica que, en este caso, genere una ventilación forzada que cumpla con los requisitos mínimos de calidad del aire ya mostrados. Recordemos que el producto debe ser capaz de sustituir el sistema de ventilación del edificio, y por lo tanto es necesario contemplar este escenario.

El sistema de control de las compuertas puede ser tan sencillo como un sensor de temperatura que accione un relé que ordene la apertura de las compuertas. Se consideraría en este caso una temperatura a partir de la cual la chimenea solar comienza a ser eficiente.

Por otro lado, el sistema de ventilación forzada puede ponerse en funcionamiento cuando no se llegue al caudal mínimo requerido por la normativa, o a partir de un valor preestablecido.

Como en primera instancia las características térmicas de estos componentes no son especialmente exigentes, no se entrará en detalle sobre las propiedades requeridas como se ha llevado a cabo con el acristalamiento y el muro absorbedor, más allá de que sean capaces de soportar las temperaturas alcanzadas durante el funcionamiento de la chimenea solar.

## 4.2 Análisis de alternativas disponibles

Una vez conocidas las propiedades requeridas de cada uno de los componentes junto con las necesidades constructivas y económicas del producto, se pasa a buscar proveedores y fabricantes capaces de proporcionar cada componente con el mayor grado de parecido posible con el óptimo.

Una vez realizado el acopio de información sobre los modelos y gamas disponibles, se evaluarán las opciones posibles y reales para fabricar uno o varios prototipos sobre los que comprobar la validez de la solución planteada en la primera etapa del trabajo.

### 4.2.1 Acristalamiento

Se muestra a continuación algunos de los fabricantes encontrados después de una búsqueda exhaustiva de acristalamientos, cuyas propiedades se asemejan lo máximo posible a las condiciones de diseño.

Se resumen entonces las propiedades requeridas para el acristalamiento, junto con las necesidades constructivas para hacer viable la fabricación.

- Propiedades. Materiales y composición
  - Alta transmisibilidad
  - Baja capacidad de absorción de calor
  - Elevada resistencia térmica
  - Baja emisividad
  - Resistencia a agentes externos e impactos

- Viabilidad de fabricación y modo de montaje: baja complejidad en los procesos de fabricación, una única sola pieza o varias piezas de fácil montaje.
- Precio: bajo precio, sin renunciar a la búsqueda de los materiales óptimos
- Localización: mínima lejanía al lugar de implantación. Mínimos gastos de transporte

Para la realización de los planos de fabricación se ha considerado acristalamiento de 82x100 cm de ancho y largo, y de un espesor lo menor posible, siendo esta medida escalable a las necesidades constructivas.

A continuación, se recogen los principales fabricantes de acristalamientos que se han encontrado durante la búsqueda de proveedores:

Nombre de la empresa	Espacio web	Número y correo de contacto
Guardian glass	guardianglass.com	Francisco Javier Parra, jparra@guardian.com 600 900 668
AGC	agc.com	Alex Siuro, Alex.Siuro@agc.com 628 142 400
Tvitec	tvitecglass.com	Departamento técnico: tecnico@tvitec.com Arturo Javier Lorenzo ajlorenzo@tvitec.com 677 913 069 987021925
Saint Gobain	saint-gobain.es	Inés González Campayo (LinkedIn) Mensaje enviado desde página web
Control Glass	controlglass.com	info@controlglass.com
Vidrios online	comprarvidriosonline.com	info@comprarvidriosonline.com
Crevillente	cristaleriacrevillente.com	@cristaleriacrevillente.com

Tabla 17. Fabricantes de acristalamientos contactados

Se muestran a continuación algunos de los modelos que mejor se adaptan a las necesidades requeridas, según la información proporcionada por el fabricante:

### **ClimaGuard 1.0+, Guardian Glass**

Se trata de un vidrio aislante térmico que proporciona el mayor nivel de transmisión de luz y de aislamiento térmico físicamente posible en un panel de vidrio aislante doble 4-16-4 (posibilidad de panel triple).

El vidrio tiene un alto grado de transparencia, aumentando al máximo la luz transmitida hacia el muro absorbente. Un coeficiente de transferencia de calor U muy bajo aísla contra la pérdida de calor, ya que protege frente a la condensación y las corrientes descendentes, provocando además que el calor del interior de la chimenea no salga al exterior. Puede ser templado térmicamente, mejorando su resistencia a las elevadas temperaturas y frente a los impactos.

Según el fabricante, sería posible fabricar este vidrio hasta unos 3,5 o 4 m de largo en prácticamente cualquier parte; a partir de estas dimensiones sería necesario recurrir a fabricantes especializados.

Luz visible			Luz ultravioleta	Energía solar							Propiedades térmicas
Trasmisión	Reflectancia		Índice general de variación de color (Ra)	Trans UV (τuv %)	Trasmisión	Reflectancia		Absorbancia	Factor solar (g%)	Coefficiente de sombra (sc)	Valor U
Visible (τv %)	pv % out	pv % en			Solar (τe %)	pe % out	pe % en	Solar (αe %)	Factor solar (g%)	Coefficiente de sombra (sc)	Ug W/m²·K
Doble acristalamiento											
75,5	17,5	18,2	96,3	25,5	46,6	38,8	40,2	14,6	52,5	0,60	1,0
Triple acristalamiento											
63,3	24,6	24,6	93,6	11,7	33,6	46,6	46,6	19,8	39,1	0,45	0,5

Tabla 18. Características modelo ClimaGuard 1.0+, Guardian Glass

### **AGC Glass Europe**

Después de analizar la gama disponible y realizar una puesta en contacto con el personal técnico, se llega a la conclusión de que AGC dispone de vidrios de control solar y vidrios de baja emisividad que se acostumbran a instalar en dobles acristalamientos en ventanas, con lo que efectivamente el vidrio se calienta al recibir la radiación solar. El problema radica en que en estos vidrios se produce un transvase de calor del interior de la cámara al exterior, algo perjudicial en el caso de la chimenea solar. Es por esto que la solución propuesta por AGC Glass Europe quedaría descartada en primera instancia, aunque si fuera necesario podría analizarse qué cantidad de calor se expulsa al exterior.

No obstante, en el caso de que quisiera recurrirse a estas soluciones por otras prestaciones disponibles, se dispone de un configurador de productos en el cual pueden introducirse distintas combinaciones que generan simulaciones con los que iterar y encontrar un producto con condiciones específicas.

Enlace al configurador: <https://agcglasseurope.showpad.com/share/NOBsNxzGQyQNHCCyyfVtzC>

### **4.2.2 Muro absorbedor**

Se muestra a continuación algunos de los fabricantes encontrados después de una búsqueda exhaustiva de superficies acumuladoras de hormigón, cuyas propiedades se asemejan lo máximo posible a las condiciones de diseño.

Se resumen entonces las propiedades requeridas para el muro absorbedor, junto con las necesidades constructivas para hacer viable la fabricación.

- Propiedades. Materiales y composición
  - Alta absorción de radiación solar
  - Baja reflectividad
  - Buena conductividad térmica
  - Resistencia a altas temperaturas
  - Elevada inercia térmica
- Viabilidad de fabricación y modo de montaje: baja complejidad en los procesos de fabricación, una única sola pieza o varias piezas de fácil montaje
- Precio: bajo precio, sin renunciar a la búsqueda de los materiales óptimos
- Localización: mínima lejanía al lugar de implantación. Mínimos gastos de transporte.

A continuación, se recogen los principales fabricantes de acristalamientos que se han encontrado durante la búsqueda de proveedores:

Nombre de la empresa	Espacio web	Número y correo de contacto
Hormigones Sevilla	hormigonessevilla.com	hormigon@hormigonessevilla.com 954510157
Alba Quercus	-	jesus@albaquercus.com 924371907
Intromac (investigación)	neurona.gobex.es/centros/intromac	Mario Trujillo, mario.trujill@org.juntaex.es 927 005 072 Raquel Pozas 927005068
Zenet	www.zenet.es	nuria@zenet.es

Tabla 19. Fabricantes de hormigón contactados

# 5 ANÁLISIS DE PARÁMETROS TÉRMICOS

## 5.1 Variables de estudio

Además del análisis dimensional sintetizado en el apartado de Optimización de dimensiones, en esta sección se añade un estudio de otras magnitudes que intervienen en los cálculos llevados a cabo, magnitudes que como se comprobará a continuación resultan verdaderamente sustanciales y pueden determinar la factibilidad de la solución implementada.

En este caso se estudia la influencia sobre el sistema muro absorbedor – cámara de aire, siendo los parámetros analizados (parámetros de entrada):

- La densidad del hormigón
- El calor específico del hormigón
- La temperatura inicial del hormigón
- La temperatura de entrada del aire a la cámara
- El coeficiente de película convectivo entre el hormigón y el aire

La variación de estos parámetros tendrá como resultado a su vez una variación en los parámetros de salida del modelo. Estos parámetros (parámetros de salida) son:

- La masa del muro de hormigón
- El tiro generado en la chimenea
- El intercambio calorífico experimentado
- El caudal de aire a lo largo de la cámara
- La temperatura del fluido (media entre la temperatura de entrada y de salida del aire)
- La temperatura del aire a la salida de la chimenea
- La velocidad del aire a lo largo de la chimenea
- La temperatura final del hormigón

Para ello, se partirá de unos valores iniciales de los parámetros enumerados, valores que irán cambiando en cada uno de los análisis realizados a lo largo del apartado. Recordando las dimensiones optimizadas en el trabajo realizado por Doña Teresa Palomo:

Parámetros dimensionales	Unidades	Valores optimizados
Ancho (W)	(m)	0,6
Altura (H)	(m)	5
Separación entre lamas (L)	(m)	0,08
Espesor de la lama (e)	(m)	0,02

Tabla 20. Valores dimensionales optimizados

Cabe destacar que el área obtenida gracias a la adición de las lamas aumenta en gran medida la inercia térmica, y con ello la eficiencia del sistema.

Estos valores se mantendrán constantes a lo largo de los estudios iterativos llevados a cabo en este apartado.



Pasando entonces a los parámetros térmicos nombrados, se realiza una simulación inicial cuyos datos y resultados son los siguientes:

Parámetros de entrada		
Variable de cálculo	Unidades	Valor
Densidad del hormigón ( $\rho_h$ )	kg/m <sup>3</sup>	2500
Calor específico del hormigón ( $c_p$ )	kJ/kgK	0,88
Temperatura inicial del hormigón ( $T_{hi}$ )	°C	60
Temperatura de entrada del aire a la cámara ( $T_{ent}$ )	°C	25
Coefficiente de película convectivo entre el hormigón y el aire ( $h_c$ )	W / m <sup>2</sup> K	3,39
Parámetros de salida		
Variable de cálculo	Unidades	Valor
Masa del muro de hormigón ( $m_h$ )	kg	170
Tiro generado en la chimenea ( $\Delta P_{ftotal}$ )	Pa	0,3239
Intercambio calórico experimentado ( $Q_a, Q_h$ )	W	572,3
Caudal de aire ( $q_{aire}$ )	m <sup>3</sup> /s	0,0363
Temperatura del fluido ( $T_{fluido}$ )	°C	33,6
Temperatura del aire a la salida ( $T_{sal}$ )	°C	40,7
Velocidad del aire ( $v$ )	m/s	0,6616
Temperatura final del hormigón ( $T_{hf}$ )	°C	73,77

Tabla 21. Parámetros iniciales de estudio

## 5.2 Consideraciones teóricas

Cabe destacar que los dos primeros parámetros de estudio (densidad y calor específico del hormigón, junto con la geometría) están estrechamente relacionados con la inercia térmica del sistema. Tal y como se ha comentado en apartados anteriores, cuánto mayor es la inercia térmica del sistema, mayor será la eficiencia de la chimenea solar en régimen nocturno, ya que estará más tiempo realizando el intercambio de calor.

A su vez, la diferencia de temperaturas, el coeficiente de calor convectivo y el área de la superficie están estrechamente relacionados con la tasa de pérdida de calor de un cuerpo. Según la Ley de enfriamiento de Newton:

*“La tasa de pérdida de calor de un cuerpo es directamente proporcional a la diferencia de temperaturas entre el cuerpo y sus alrededores, siempre que la diferencia de temperatura no sea demasiado grande y la naturaleza de la superficie radiante permanezca igual.”*

Esta ley modela los mecanismos de transferencia de calor por convección que tienen lugar en el interior de la

chimenea solar, según la expresión.

$$Q_{CV} = h_c \cdot A \cdot (T_s - T_{inf})$$

Siendo:

- $Q_{CV}$  el intercambio calorífico por convección entre la superficie de hormigón y la cámara de aire
- $h_c$  el coeficiente de película convectivo entre el hormigón y el aire
- $A$  el área en el que se produce el intercambio
- $T_s$  la temperatura en la superficie de contacto en la que se produce el intercambio
- $T_{inf}$  la temperatura a una distancia determinada de la superficie

Por otro lado, para comprender mejor la relación entre el calor intercambiado y las diferencias de temperatura entre fluidos, resulta de utilidad acudir a la metodología de la Diferencia de Temperatura Logarítmica Media (DTLM). Esta tecnología es de aplicación fundamental en los intercambiadores de calor y será de aplicación en la chimenea solar objeto de estudio (ya que esta no deja de ser un intercambiador de calor). Esta metodología de cálculo permite relacionar en intercambio de calor experimentado con las diferencias de temperatura entre fluidos, mediante la expresión:

$$Q = U \cdot A_e \cdot DTLM$$

Siendo:

- $Q$  el calor intercambiado
- $U$  el coeficiente global de transmisión de calor
- $A_e$  el área perpendicular de transporte
- $DTLM$  la Diferencia de Temperatura Logarítmica Media

A su vez, la DTLM se calcula mediante la expresión:

$$DTLM = \frac{\Delta T_e - \Delta T_s}{\ln \frac{\Delta T_e}{\Delta T_s}}$$

Siendo:

- $\Delta T_e$  la diferencia de temperaturas a la entrada de la chimenea
- $\Delta T_s$  la diferencia de temperatura a la salida de la chimenea

Una representación de esto último puede verse en la siguiente gráfica:

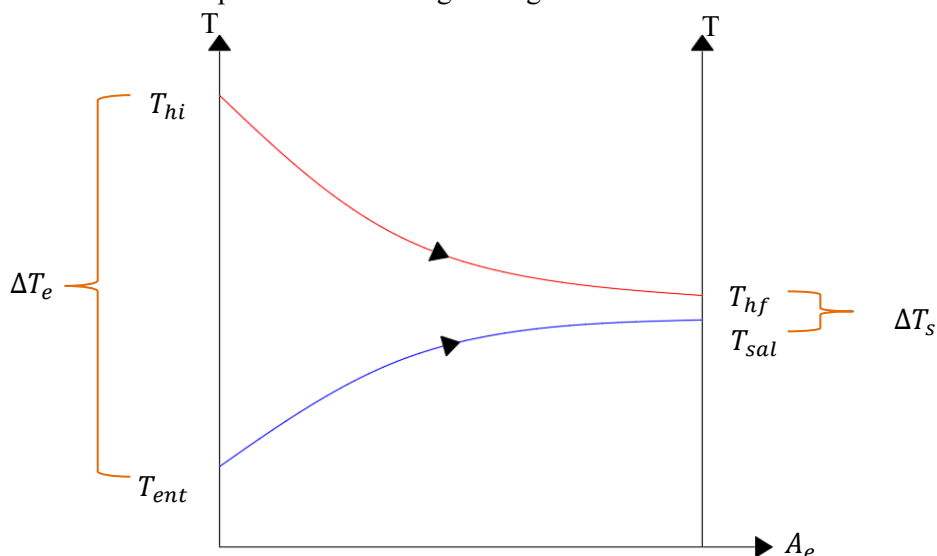


Figura 27. Representación DTLM [Elaboración propia]

De esta forma:

$$\Delta T_e = T_{hi} - T_{ent}$$

$$\Delta T_s = T_{ho} - T_{sal}$$

Ahora sí, se comienza con las simulaciones objeto del análisis del sistema. Cabe destacar que el análisis llevado a cabo tiene como objetivo estudiar de manera cualitativa la influencia que tienen los parámetros de entrada sobre los parámetros de salida, y en consecuencia en la eficiencia de la chimenea.

Esto quiere decir que los resultados obtenidos pueden variar ligeramente dependiendo de otras situaciones no concebidas en la herramienta de modelado. Lo que se pretende con este estudio es obtener hacia qué valores máximos deben apuntar las características de los materiales que conforman la chimenea solar, principalmente el acristalamiento y el prefabricado de hormigón.

### 5.3 Proceso de simulación

A partir de esta situación inicial, se irán variando los valores de los parámetros de entrada y se irán analizando los resultados obtenidos en los parámetros de salida. Para facilitar la comprensión del lector se irá replicando la tabla recién expuesta, señalando en azul las celdas que sufren alguna modificación.

#### 5.3.1 Densidad del hormigón

Como es de sobra conocido, la densidad del hormigón se define como la cantidad de peso del material por una unidad de volumen ( $\text{kg/m}^3$ ).

En torno a esta propiedad se lleva a cabo una clasificación de los hormigones, distinguiéndose entre:

- Hormigones de tipo ligero: desde  $200 \text{ kg/m}^3$  a  $1500 \text{ kg/m}^3$ .
- Apisonados: desde  $2000 \text{ kg/m}^3$  a  $2200 \text{ kg/m}^3$ .
- Vibrados: desde  $2300 \text{ kg/m}^3$  a  $2400 \text{ kg/m}^3$ .
- Centrifugados: desde  $2400 \text{ kg/m}^3$  a  $2500 \text{ kg/m}^3$ .
- Proyectados: desde  $2500 \text{ kg/m}^3$  a  $2600 \text{ kg/m}^3$ .
- Hormigones de tipo pesado: pueden llegar hasta  $4000 \text{ kg/m}^3$ . Este tipo de hormigón es utilizado como protección contra radiaciones.

Como se ha comentado anteriormente, una variación en la densidad del hormigón llevará consigo una variación en la inercia térmica del sistema.

Realizando entonces la primera simulación, en la cual se aumenta la densidad del hormigón desde  $2500 \text{ kg/m}^3$  hasta  $3500 \text{ kg/m}^3$ :

Parámetros de entrada		
Variable de cálculo	Unidades	Valor
Densidad del hormigón ( $\rho_h$ )	$\text{kg/m}^3$	3500
Calor específico del hormigón ( $c_p$ )	$\text{kJ/kgK}$	0,88
Temperatura inicial del hormigón ( $T_{hi}$ )	$^{\circ}\text{C}$	60

Temperatura de entrada del aire a la cámara ( $T_{ent}$ )	°C	25
Coefficiente de película convectivo entre el hormigón y el aire ( $h_c$ )	W / m <sup>2</sup> K	3,39
<b>Parámetros de salida</b>		
<b>Variable de cálculo</b>	<b>Unidades</b>	<b>Valor</b>
Masa del muro de hormigón ( $m_h$ )	kg	238
Tiro generado en la chimenea ( $\Delta P_{f total}$ )	Pa	0,3239
Intercambio calórico experimentado ( $Q_a, Q_h$ )	W	572,3
Caudal de aire ( $q_{aire}$ )	m <sup>3</sup> /s	0,0363
Temperatura del fluido ( $T_{fluido}$ )	°C	33,6
Temperatura del aire a la salida ( $T_{sal}$ )	°C	40,7
Velocidad del aire ( $v$ )	m/s	0,6616
Temperatura final del hormigón ( $T_{hf}$ )	°C	69,84

Tabla 22. Variación en la densidad del hormigón

Se comprueba cómo al aumentar la densidad del hormigón, aumenta también la masa del muro de hormigón (como no podía ser de otra forma) ya que:

$$\rho_h = m_h \cdot V_h$$

El aumento de la masa puede presentar dificultades a la hora del manejo del producto y de su transporte, al ser más pesado podrían ser necesarios vehículos y herramientas especializados en el proceso de tratamiento y transporte al lugar de destino.

Por otro lado, cabe destacar lo siguiente: tratando el problema desde un punto de vista meramente matemático, se observa cómo el calor intercambiado obtenido es el mismo que en la situación inicial, ya que esto es una imposición teórica del problema  $Q_a = Q_h$ . Al utilizarse un software que realmente se limita a resolver un sistema de ecuaciones siguiendo un proceso iterativo, la solución matemáticamente es válida. El calor que transfiere el hormigón al aire debe ser igual al que experimenta el aire entre la entrada y la salida, por eso se produce esa igualdad de  $Q_a, Q_h$ . Físicamente lo que se observa es que al aumentar la densidad del hormigón se beneficia el intercambio de calor, no viendo un aumento en el valor de  $Q_a, Q_h$  como tal en la solución, sino disminuyendo la temperatura final del hormigón.

Esto es, siendo:

$$Q_h = m_h c_{ph} (T_{hi} - T_{hf}) \frac{1000}{3600}$$

Al ser  $Q_a = Q_h$ ,  $c_{ph} = cte$  y  $T_{hi} = cte$ , al variar el valor de  $\rho_h$  se obtiene una variación en  $m_h$ , lo que resulta en un cambio en el valor de  $T_{hf}$ , tal y como se observa en los resultados de la simulación.

Como se ha mostrado en las consideraciones teóricas, una disminución en  $T_{hf}$  significa un decremento en  $\Delta T_s$  y con ello un aumento en la  $DTLM$ , que finalmente se traduce en un incremento en el calor real intercambiado en la chimenea solar.

### 5.3.2 Calor específico del hormigón

El calor específico o capacidad térmica específica es una magnitud física que se define como la cantidad de calor que hay que suministrar a la unidad de masa de una sustancia o sistema termodinámico para elevar su temperatura en una unidad.

Al igual que ocurre con la densidad del hormigón, una variación en el calor específico del muro prefabricado de hormigón llevará consigo una variación en la inercia térmica del sistema.

Se pasa entonces a repetir la simulación, esta vez modificando el valor de calor específico, pasando este de 0,88 kJ/kgK a 2,5 kJ/kgK.

Parámetros de entrada		
Variable de cálculo	Unidades	Valor
Densidad del hormigón ( $\rho_h$ )	kg/m <sup>3</sup>	2500
Calor específico del hormigón ( $c_p$ )	kJ/kgK	2,5
Temperatura inicial del hormigón ( $T_{hi}$ )	°C	60
Temperatura de entrada del aire a la cámara ( $T_{ent}$ )	°C	25
Coeficiente de película convectivo entre el hormigón y el aire ( $h_c$ )	W / m <sup>2</sup> K	3,39
Parámetros de salida		
Variable de cálculo	Unidades	Valor
Masa del muro de hormigón ( $m_h$ )	kg	170
Tiro generado en la chimenea ( $\Delta P_{ftotal}$ )	Pa	0,3239
Intercambio calórico experimentado ( $Q_a, Q_h$ )	W	572,3
Caudal de aire ( $q_{aire}$ )	m <sup>3</sup> /s	0,0363
Temperatura del fluido ( $T_{fluido}$ )	°C	33,6
Temperatura del aire a la salida ( $T_{sal}$ )	°C	40,7
Velocidad del aire ( $v$ )	m/s	0,6616
Temperatura final del hormigón ( $T_{hf}$ )	°C	64,85

Tabla 23. Variación en el calor específico del hormigón

En este caso ocurre exactamente lo mismo que al variar la densidad del hormigón. Al modificar el parámetro de entrada referido al calor específico del hormigón, matemáticamente se observa cómo el calor intercambiado obtenido es el mismo que en la situación inicial, ya que es una imposición teórica del problema  $Q_a = Q_h$ . Pero físicamente lo que se observa es que al aumentar el calor específico del hormigón se beneficia el intercambio de calor, no viendo un aumento en el valor de  $Q_a, Q_h$  como tal en la solución, sino disminuyendo la temperatura final del hormigón.

Esto es, siendo:

$$Q_h = m_h c_{ph} (T_{hi} - T_{hf}) \frac{1000}{3600}$$

Al ser  $Q_a = Q_h$ ,  $m_h = cte$  y  $T_{hi} = cte$ , al variar el valor de  $c_{ph}$  resulta un cambio en el valor de  $T_{hf}$ , tal y como se observa en los resultados de la simulación.

Como se ha mostrado en las consideraciones teóricas, una disminución en  $T_{hf}$  significa un decremento en  $\Delta T_s$  y con ello un aumento en la *DTLM*, que finalmente se traduce en un incremento en el calor real intercambiado en la chimenea solar.

### 5.3.3 Coeficiente de película convectivo entre el hormigón y el aire

El coeficiente de película por convección se puede definir como la velocidad de transferencia de calor entre una superficie sólida y un fluido por unidad de superficie por unidad de diferencia de temperatura.

Este parámetro no es una propiedad del fluido, sino que es un parámetro determinado experimentalmente cuyo valor depende de todas las variables que influyen en la convección, como la geometría de la superficie, la naturaleza del movimiento del fluido, las propiedades del fluido y la velocidad del fluido. Es por esto que en ocasiones es difícil obtener un valor estrictamente fiable de esta magnitud. En la siguiente simulación se considerará un valor relativamente común según la bibliografía disponible, pero precisamente este será uno de los parámetros de interés una vez fabricados los primeros prototipos.

Se analiza entonces el comportamiento de la chimenea solar al producirse una variación en este parámetro, pasando desde 3,39 W / m<sup>2</sup> K a 4,5 W / m<sup>2</sup> K:

Parámetros de entrada		
Variable de cálculo	Unidades	Valor
Densidad del hormigón ( $\rho_h$ )	kg/m <sup>3</sup>	2500
Calor específico del hormigón ( $c_p$ )	kJ/kgK	0,88
Temperatura inicial del hormigón ( $T_{hi}$ )	°C	60
Temperatura de entrada del aire a la cámara ( $T_{ent}$ )	°C	25
Coeficiente de película convectivo entre el hormigón y el aire ( $h_c$ )	W / m <sup>2</sup> K	4,5

Parámetros de salida		
Variable de cálculo	Unidades	Valor
Masa del muro de hormigón ( $m_h$ )	kg	170
Tiro generado en la chimenea ( $\Delta P_{ftotal}$ )	Pa	0,3772
Intercambio calórico experimentado ( $Q_a, Q_h$ )	W	717,5
Caudal de aire ( $q_{aire}$ )	m <sup>3</sup> /s	0,0396
Temperatura del fluido ( $T_{fluido}$ )	°C	35,1
Temperatura del aire a la salida ( $T_{sal}$ )	°C	43
Velocidad del aire ( $v$ )	m/s	0,7257
Temperatura final del hormigón ( $T_{hf}$ )	°C	77,27

Tabla 24. Variación en el coeficiente de película convectivo

Puede comprobarse fácilmente cómo una variación en el coeficiente de película convectivo afecta significativamente en prácticamente todos los parámetros de salida. Es más, un aumento en este parámetro de entrada trae consigo un aumento interesante en los parámetros de salida. Así, incrementando el coeficiente de película convectivo desde 3,39 W / m<sup>2</sup> K a 4,5 W / m<sup>2</sup> K, se observa un incremento en el tiro generado de la chimenea (pasando desde 0,3239 Pa a 0,3772 Pa), en el caudal de aire (pasando de 0,0363 m<sup>3</sup>/s a 0,0396 m<sup>3</sup>/s), en la velocidad de circulación del aire (pasando de 0,6616 m/s a 0,7257 m/s), o en intercambio calórico experimentado (pasando desde 572,3 W a 717,5 W), entre otros.

Este aumento refleja a la perfección el comportamiento previsto según la Ley de enfriamiento de Newton, ya que:

$$Q_{CV} = h_c \cdot A \cdot (T_S - T_{inf}); \text{ si } h_c \uparrow \rightarrow Q_{CV} \uparrow$$

Se observa que el coeficiente de película convectivo tiene una importancia crucial en el correcto funcionamiento de la chimenea solar, de ahí la necesidad de calcularlo empíricamente una vez fabricado el prototipo.

Aun así, queda demostrado que un aumento en el coeficiente de película trae consigo una mejora de la eficiencia de la chimenea solar.

### 5.3.4 Temperatura inicial del hormigón

La temperatura inicial del hormigón es una componente fundamental en el cálculo del intercambio convectivo producido.

En la simulación de este caso se pasa de 60 °C a 90°C, respondiendo esta de la forma:

Parámetros de entrada		
Variable de cálculo	Unidades	Valor
Densidad del hormigón ( $\rho_h$ )	kg/m <sup>3</sup>	2500
Calor específico del hormigón ( $c_p$ )	kJ/kgK	0,88
Temperatura inicial del hormigón ( $T_{hi}$ )	°C	90

Temperatura de entrada del aire a la cámara ( $T_{ent}$ )	°C	25
Coefficiente de película convectivo entre el hormigón y el aire ( $h_c$ )	W / m <sup>2</sup> K	3,39
<b>Parámetros de salida</b>		
<b>Variable de cálculo</b>	<b>Unidades</b>	<b>Valor</b>
Masa del muro de hormigón ( $m_h$ )	kg	170
Tiro generado en la chimenea ( $\Delta P_{f total}$ )	Pa	0,4873
Intercambio calórico experimentado ( $Q_a, Q_h$ )	W	1125
Caudal de aire ( $q_{aire}$ )	m <sup>3</sup> /s	0,04586
Temperatura del fluido ( $T_{fluido}$ )	°C	38,2
Temperatura del aire a la salida ( $T_{sal}$ )	°C	49,4
Velocidad del aire ( $v$ )	m/s	0,8481
Temperatura final del hormigón ( $T_{hf}$ )	°C	117,1

Tabla 25. Variación en la temperatura inicial del hormigón

Se observa de nuevo una estrecha relación entre los parámetros de entrada y salida del sistema. Así, un aumento en la temperatura inicial del muro prefabricado de hormigón supone verdaderos incrementos en los parámetros de salida. De esta manera, un aumento en la temperatura inicial del hormigón desde 60 °C a 90 °C supone un incremento de incremento en el tiro generado de la chimenea (pasando desde 0,3239 Pa a 0,4873 Pa), en el caudal de aire (pasando de 0,0363 m<sup>3</sup>/s a 0,04586 m<sup>3</sup>/s), en la velocidad de circulación del aire (pasando de 0,6616 m/s a 0,8481 m<sup>3</sup>/s), o en intercambio calórico experimentado (pasando desde 572,3 W a 1125 W), entre otros.

Volviendo a la metodología DTLM, se comprueba lo siguiente:

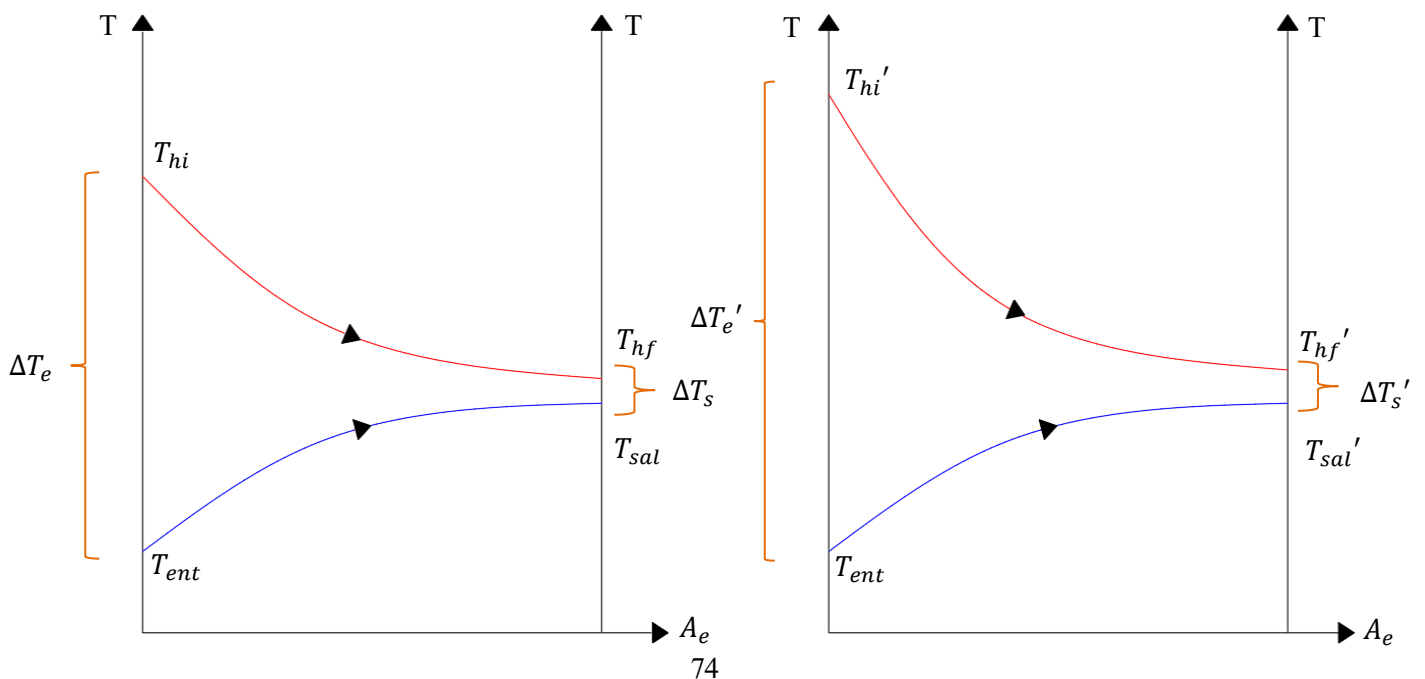




Figura 28. Variación de la DTLM debido a variación en la temperatura inicial del hormigón [Elaboración propia]

Se comprueba que un aumento en  $T_{hi}$  se traduce en un aumento de  $\Delta T_e$ , y por tanto en un incremento de la DTLM y por consiguiente en un incremento del calor intercambiado:

$$Si T_{hi} \uparrow \rightarrow \Delta T_e \uparrow \rightarrow DTLM \uparrow \rightarrow Q \uparrow$$

Así ocurre en el proceso de simulación. Se comprueba además que el aumento del calor intercambiado lleva consigo el aumento de la mayoría de parámetros de salida, algo muy favorable para la mejora de la eficiencia de la chimenea solar.

### 5.3.5 Temperatura de entrada del aire

La temperatura con la que el aire entra en la chimenea también es una variable fundamental en la eficiencia de esta.

Para esta caso, se pasará de una temperatura de entrada de 25°C a 35°C, ocurriendo lo siguiente:

Parámetros de entrada		
Variable de cálculo	Unidades	Valor
Densidad del hormigón ( $\rho_h$ )	kg/m <sup>3</sup>	2500
Calor específico del hormigón ( $c_p$ )	kJ/kgK	0,88
Temperatura inicial del hormigón ( $T_{hi}$ )	°C	60
Temperatura de entrada del aire a la cámara ( $T_{ent}$ )	°C	35
Coefficiente de película convectivo entre el hormigón y el aire ( $h_c$ )	W / m <sup>2</sup> K	3,39
Parámetros de salida		
Variable de cálculo	Unidades	Valor
Masa del muro de hormigón ( $m_h$ )	kg	170
Tiro generado en la chimenea ( $\Delta P_{ftotal}$ )	Pa	0,2491
Intercambio calórico experimentado ( $Q_a, Q_h$ )	W	389,7
Caudal de aire ( $q_{aire}$ )	m <sup>3</sup> /s	0,03075
Temperatura del fluido ( $T_{fluido}$ )	°C	42
Temperatura del aire a la salida ( $T_{sal}$ )	°C	47,6
Velocidad del aire ( $v$ )	m/s	0,5757
Temperatura final del hormigón ( $T_{hf}$ )	°C	69,38

Tabla 26. Variación en la temperatura de entrada del aire

Se obtiene que para un incremento de la temperatura de entrada del aire desde 25 °C a 35°C, se observa una disminución en el tiro generado de la chimenea (pasando desde 0,3239 Pa a 0,2491 Pa), en el caudal de aire (pasando de 0,0363 m<sup>3</sup>/s a 0,389,7 m<sup>3</sup>/s), en la velocidad de circulación del aire (pasando de 0,6616 m/s a 0,5757 m<sup>3</sup>/s), o en el intercambio calorífico experimentado (pasando desde 572,3 W a 389 W), entre otros.

Esto se debe al mismo mecanismo que ocurre en el caso de la temperatura inicial del hormigón, esta vez disminuyendo el valor del  $\Delta T_e$ :

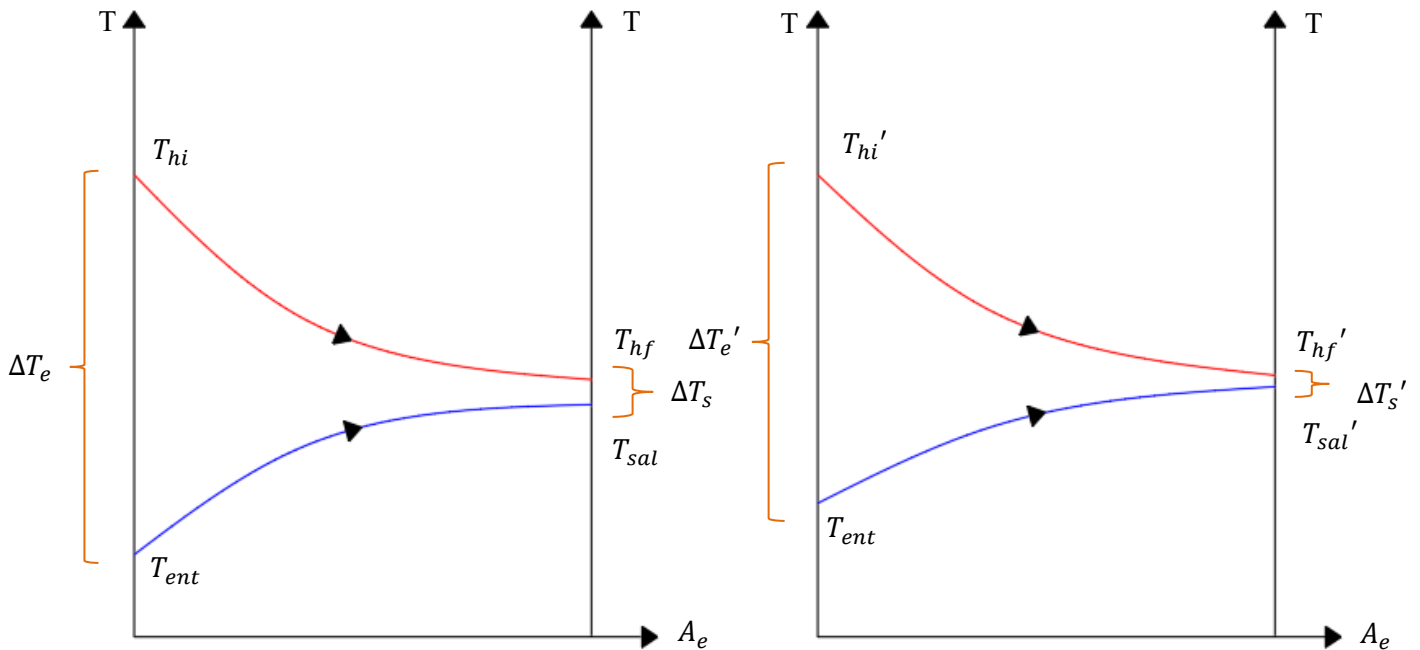


Figura 29. Variación de la DTLM debido a variación en la temperatura de entrada del aire [Elaboración propia]

Se comprueba que un aumento en  $T_{ent}$  se traduce en una disminución de  $\Delta T_e$ , y por tanto en un decremento de la  $DTLM$  y por consiguiente en un decremento del calor intercambiado:

$$Si T_{ent} \uparrow \rightarrow \Delta T_e \downarrow \rightarrow DTLM \downarrow \rightarrow Q \downarrow$$

Así ocurre en el proceso de simulación. Se comprueba además que la disminución del calor intercambiado lleva consigo la disminución de la mayoría de los parámetros de salida, algo desfavorable para la mejora de la eficiencia de la chimenea solar.

# 6 CONCLUSIONES DEL ESTUDIO E IDEAS FUNDAMENTALES

## 6.1 Síntesis del análisis paramétrico

Una vez realizadas las simulaciones mostradas anteriormente, se llegan a unas conclusiones bastante interesantes a la hora de industrializar el modelo, principal cometido de este documento.

Seguidamente se muestra una tabla que trata de sintetizar el conjunto de escenarios modelados, con el objetivo de facilitar la comprensión del lector y favorecer el entendimiento a la hora de buscar materiales y fabricantes que puedan adaptarse a los requerimientos que se precisan.

Para ello se acompañará el contenido de flechas ascendentes o descendentes (↑; ↓) en función de si el parámetro de entrada aumenta o disminuye en comparación con el valor inicial.

Así mismo, se señalarán en verde los parámetros modificados que mejoran la eficiencia de la chimenea solar, y en rojo aquellos valores que perjudican tal funcionamiento.

Parámetros de entrada						
Variable de cálculo	Sit. inicial	Sit. 1	Sit. 2	Sit. 3	Sit. 4	Sit. 5
Densidad del hormigón, $\rho_h$ (kg/m <sup>3</sup> )	2500	3500 (↑)	2500	2500	2500	2500
Calor específico del hormigón, $c_p$ (kJ/kgK)	0,88	0,88	2,5 (↑)	0,88	0,88	0,88
Temperatura inicial del hormigón, $T_{hi}$ (°C)	60	60	60	60	90 (↑)	60
Temperatura de entrada del aire a la cámara, $T_{ent}$ (°C)	25	25	25	25	25	35 (↑)
Coefficiente de película convectivo entre el hormigón y el aire, $h_c$ (W / m <sup>2</sup> K)	3,39	3,39	3,39	4,5 (↑)	3,39	3,39
Parámetros de salida						
Variable de cálculo	Unidades	Valor				
Masa del muro de hormigón, $m_h$ (kg)	170	238 (↑)	170	170	170	170
Tiro generado en la chimenea, $\Delta P_{ftotal}$ (Pa)	0,3239	0,3239	0,3239	0,3772 (↑)	0,4873 (↑)	0,2491 (↓)

Intercambio calórico experimentado, $Q_a, Q_h$ (W)	572,3	572,3	572,3	717,5 (↑)	1125 (↑)	389,7 (↓)
Caudal de aire, $q_{aire}$ (m <sup>3</sup> /s)	0,0363	0,0363	0,0363	0,0396 (↑)	0,04586 (↑)	0,03075 (↓)
Temperatura del fluido, $T_{fluido}$ (°C)	33,6	33,6	33,6	35,1 (↑)	38,2 (↑)	42 (↑)
Temperatura del aire a la salida, $T_{sal}$ (°C)	40,7	40,7	40,7	43 (↑)	49,4 (↑)	47,6 (↑)
Velocidad del aire, $v$ (m/s)	0,6616	0,6616	0,6616	0,7257 (↑)	0,8481 (↑)	0,5757 (↓)
Temperatura final del hormigón, $T_{hf}$ (°C)	73,77	69,84 (↓)	64,85 (↓)	77,27 (↑)	117,1 (↑)	69,38 (↓)

Tabla 27. Síntesis del análisis paramétrico

## 6.2 Interpretación de los resultados

Frente a los resultados arrojados por el análisis se pueden sacar conclusiones significativas, que serán verdaderamente útiles a la hora de buscar las gamas de materiales que favorezcan en mayor medida a la eficiencia de la chimenea solar.

Como sistema de ventilación pasiva, lo primordial en la chimenea solar es que por el canal comprendido entre muro y acristalamiento circule la mayor cantidad de aire posible. Cuanto mayor sea el caudal de aire que atraviese la chimenea, mayor será el efecto chimenea producido y por tanto, mayor será la cantidad de aire exterior que entre en el edificio.

Esta “cantidad” de aire que atraviesa la chimenea no es otra cosa que el caudal de aire  $q_{aire}$ , parámetro de salida del sistema modelado. Esta magnitud es la que muestra de forma más realista e intuitiva la eficiencia del sistema. Esto es, valores mayores de  $q_{aire}$  se traducen directamente en una mayor circulación de aire y por consiguiente en una mejora del confort térmico y con ello una mejora en la eficiencia de la chimenea solar.

Por supuesto, el resto de parámetros de salida tienen una importancia relativa en cuanto a que están relacionados con el caudal de aire; solo que, en términos de eficiencia energética, el caudal sirve para dar una idea de la mejora del sistema.

Otros parámetros de salida con la temperatura del hormigón serán también muy importantes a la hora de buscar gamas de hormigón y acristalamientos que soporten las temperaturas obtenidas.

Por tanto, analizando la tabla anterior se pueden obtener los parámetros de entrada que influyen en el incremento del caudal de aire, y por tanto en el aumento de la eficiencia de la chimenea solar:

- **Densidad del hormigón,  $\rho_h$** : el aumento de la densidad del hormigón lleva consigo un aumento de la masa del muro prefabricado, y con ello una mejora en eficiencia térmica del sistema. Esto provoca no que el caudal aumente en valores máximos absolutos, sino que los niveles medios de caudal se mantengan en el tiempo. Tal y como se ha demostrado, el aumento de la densidad del hormigón

beneficia el intercambio de calor, no viendo un aumento en el valor de  $Q_a, Q_h$ , sino disminuyendo la temperatura final del hormigón. Por tanto, un aumento en la densidad del hormigón llevará consigo una mejora en la eficiencia de la chimenea solar.

- **Calor específico del hormigón,  $c_p$** : el incremento del calor específico del hormigón se traduce en una disminución en la temperatura final del hormigón, mejorando así la eficiencia de la chimenea solar.
- **Temperatura inicial del hormigón,  $T_{hi}$** : como se ha demostrado en el apartado anterior, un incremento de la temperatura inicial del hormigón lleva consigo mayores valores de la DTLM, y con ello del calor intercambiado en la chimenea. Como se acaba de mostrar, un aumento en el calor intercambiado está estrechamente relacionado con el caudal de aire que circula por el canal.
- **Temperatura de entrada del aire a la cámara,  $T_{ent}$** : inversamente a lo que ocurre con la temperatura inicial del hormigón, un aumento en la temperatura del aire se refleja en menores valores de la DTLM, llevando consigo una disminución en el calor intercambiado, y con ello un decremento del caudal.
- **Coefficiente de película convectivo entre el hormigón y el aire,  $h_c$** : este parámetro experimental tiene una importancia crucial en el caudal de aire obtenido. Tal y como se mostraba en apartados anteriores, el calor intercambiado es directamente proporcional al valor del coeficiente de película. Por tanto, un aumento en dicho coeficiente significará un aumento en el calor intercambiado y con ello un aumento del caudal.

### 6.3 Estudio del caso óptimo

Por último, se va a simular un caso de chimenea solar en el cual se consideran todas las mejoras que se han ido considerando a lo largo de todas las simulaciones, de manera simultánea. Como se quiere obtener el mejor caso posible, se considerará una temperatura de aire a la entrada de 25 °C en lugar de los 35 °C considerados en la situación 5. En este caso los parámetros de entrada serían:

Parámetros de entrada		
Variable de cálculo	Unidades	Valor
Densidad del hormigón ( $\rho_h$ )	kg/m <sup>3</sup>	3500
Calor específico del hormigón ( $c_p$ )	kJ/kgK	2,5
Temperatura inicial del hormigón ( $T_{hi}$ )	°C	90
Temperatura de entrada del aire a la cámara ( $T_{ent}$ )	°C	25
Coefficiente de película convectivo entre el hormigón y el aire ( $h_c$ )	W / m <sup>2</sup> K	4,5

Tabla 28. Parámetros de entrada en el caso óptimo

Con esta casuística concreta se obtienen los siguientes parámetros:

Parámetros de salida		
Variable de cálculo	Unidades	Valor
Masa del muro de hormigón ( $m_h$ )	kg	238
Tiro generado en la chimenea ( $\Delta P_{ftotal}$ )	Pa	0,3772
Intercambio calórico experimentado ( $Q_a, Q_h$ )	W	717,5
Caudal de aire ( $q_{aire}$ )	m <sup>3</sup> /s	0,0396
Temperatura del fluido ( $T_{fluido}$ )	°C	35,1
Temperatura del aire a la salida ( $T_{sal}$ )	°C	43
Velocidad del aire ( $v$ )	m/s	0,7257
Temperatura final del hormigón ( $T_{hf}$ )	°C	64,34

Tabla 29. Variación en la densidad del hormigón

Como era de esperar, se observa una mejora en todos los parámetros de salida obtenidos durante esta última simulación. En concreto, se pasa de:

- Un tiro generado ( $\Delta P_{ftotal}$  de 0,3239 Pa a 0,3772 Pa.
- Un intercambio de calor  $Q_a, Q_h$  de 572,3 W a 717,5 W.
- Un caudal de aire  $q_{aire}$  de 0,0363 m<sup>3</sup>/s a 0,0396 m<sup>3</sup>/s.
- Una velocidad del aire  $v$  de 0,6616 m/s a 0,7257 m/s.

Pueden compararse el resto de parámetros analizando estos últimos resultados con los parámetros de salida obtenidos en el apartado de Variables de estudio.

## 6.4 Conclusiones finales

Como conclusiones finales al trabajo realizado a lo largo del presente documento, se ha mostrado en primer lugar la base teórica, pilar fundamental del análisis posterior.

A continuación, se ha planteado de manera detallada la industrialización del diseño, realizando a continuación una búsqueda exhaustiva de valores experimentales obtenidos de la bibliografía disponible, y estableciendo contactos con diversos fabricantes de los componentes principales de la chimenea solar: acristalamiento y muro absorbedor de hormigón prefabricado, que han proporcionado información muy valiosa para esta etapa del diseño y para la futura industrialización.

Partiendo de una serie de parámetros teóricos de entrada y de la herramienta software desarrollada por Doña Teresa Palomo, junto con los valores obtenidos del análisis anterior, se suceden una serie de situaciones, variando los valores de entrada susceptibles de ser modificados durante la industrialización del sistema (véase parámetros como la densidad del hormigón) o valores que dependen de las condiciones ambientales externas (véase la temperatura de entrada del aire).

Una vez realizado el presente análisis se consigue determinar cuáles son los parámetros que modifican en mayor medida los parámetros de salida, en concreto aquellos parámetros que mejoran la eficiencia de la chimenea solar.

Con esto se lleva a cabo una última simulación, que ofrece los resultados más optimistas, considerando aplicadas todas las casuísticas que mejoran en la medida de lo posible la eficiencia de la chimenea solar.

En el apartado anexo al presente documento se presentan planos del modelo y planos básicos de fabricación con el fin de facilitar la industrialización final de los primeros prototipos. Con estos prototipos, desarrollados acorde a lo especificado a lo largo del trabajo realizado, se pretende confirmar de manera inconfusa la viabilidad técnica y tecnológica de la solución, con el objetivo final de lanzar al mercado este modelo innovador y con el que se pretende poner un granito de arena más en la mejora de la sostenibilidad del planeta.

# 7 CONSIDERACIONES ADICIONALES DEL SISTEMA

A lo largo del estudio e industrialización del diseño planteado han ido apareciendo consideraciones de diversa índole, que deberán tenerse en cuenta para conseguir una mejor entrada al mercado del producto. Centrándonos en aquellos aspectos que puedan ver modificados parámetros constructivos de la chimenea, dejando a un lado los parámetros teóricos de cálculo, se plantean a continuación algunas reflexiones:

## 7.1 Instalación de la chimenea solar sobre fachada

Ya que la chimenea solar diseñada se instalará en una de las fachadas del edificio, será necesario tener en cuenta algunas consideraciones adicionales:

### 7.1.1 Normativa local

El tamaño de la chimenea supone una reducción en la superficie “útil” de la vivienda o del edificio, ya que ocupará un espacio no transitable por los ocupantes del edificio. Además de no superar una altura máxima impuesta por la normativa local, debe intentarse que el ancho y sobre todo el espesor de la chimenea solar sea el menor posible.

Esto es algo a tener en cuenta en nuevas construcciones, donde se tiene muy en cuenta el precio de la parcela en términos de  $m^2$ ; pero este requisito cobra mayor importancia aun en edificios existentes, y en zonas urbanas.

Por un lado, si el espacio exterior al edificio está clasificado como suelo público (como es el caso de vías o aceras), salvo excepciones no sería posible añadir elementos a la fachada. Sin embargo, si ese espacio forma parte del suelo clasificado como residencial, sí que sería posible.

Ya que lo normal es que el límite del edificio sea suelo público, entran en juego las Ordenanzas Municipales y el propio Ayuntamiento de la localidad.

Por otro lado, en casos relacionados con mejoras del inmueble del tipo accesibilidad o sostenibilidad (siendo este el caso de la chimenea solar objeto de este proyecto), es posible, mediante iniciativa privada, llegar a un acuerdo con el Ayuntamiento, cediendo este el espacio necesario para la intervención. Un ejemplo de este punto es la ocupación del acerado para instalar un ascensor que permita la accesibilidad a determinados edificios.



Figura 30. Instalación de ascensor sobre acerado



### 7.1.2 Recuperación de calor

Como se ha comentado a lo largo del presente documento, uno de los objetivos primordiales de la chimenea solar es su instalación en lugar del sistema de ventilación propio del edificio.

El Reglamento de Instalaciones Térmicas en Edificios (RITE) [9], en el artículo 11 del Capítulo II, dispone que las instalaciones térmicas han de diseñarse de manera que se mantenga una calidad del aire interior tolerable en las estancias ocupadas, aportando un caudal de aire que proceda del exterior y se asegure la extracción del aire viciado del interior.

En el artículo 12 del mismo capítulo se señala que las instalaciones térmicas se han de diseñarse de modo que se reduzca el consumo de energía de las mismas y, por consiguiente, también las emisiones de gases de efecto invernadero y otros contaminantes atmosféricos, gracias al empleo de sistemas energéticamente eficientes que permitan recuperar la energía. Así, deben cumplirse dos requisitos fundamentales:

- Rendimiento energético. Todos los equipos de calor y frío han de garantizar que su rendimiento, en cualquier condición de funcionamiento, se aproxime todo lo que sea posible a su régimen máximo. En caso de la chimenea solar, el funcionamiento óptimo supondría un coste energético prácticamente nulo. Además, el diseño propuesto prolonga al máximo el funcionamiento diurno y nocturno del sistema. Por estos motivos la chimenea solar presenta un rendimiento energético mucho mayor que cualquier sistema de ventilación forzada.
- Recuperación de energía. Las instalaciones térmicas contarán con subsistemas que permitan la utilización del excedente de energía, así como su ahorro y recuperación. Es obligatorio disponer de recuperadores de energía en todos los sistemas de climatización en los que el caudal de aire expulsado por medios mecánicos sea mayor de 0,5 m<sup>3</sup>/s, de manera que se consiga el equilibrio térmico que aumente los niveles de confort de la vivienda.

Los recuperadores de calor funcionan mediante el trabajo de un ventilador que atrae el aire a su interior, un ventilador de impulsión que lo expulsa a su exterior y un intercambiador de calor. El aire extraído del interior del local pasa por dentro del recuperador de calor y se cruza sin mezclarse en el intercambiador con el aire impulsado del exterior. En el intercambiador se produce un intercambio de calor entre el aire más caliente que cede calor al aire más frío.

Los recuperadores de calor son cada vez más demandados debido a su funcionalidad. Además, la normativa vigente cada vez es más exigente con la implantación de estos aparatos, por lo que sería conveniente adaptar la chimenea solar en un futuro para añadir esta característica de intercambiador de calor.

Podría hacerse uso del calor interno del aire que sale de la chimenea para alimentar el intercambiador. Para ello el factor fundamental es que la temperatura de salida del aire sea lo máxima posible.

# 8 ANEXO I. REPRESENTACIÓN DEL MODELO Y PLANOS DE FABRICACIÓN

## 8.1 Partes de la chimenea solar

Como se verá a continuación, a la hora de industrializar la chimenea solar será conveniente dividir el conjunto en piezas independientes. En concreto, se han diseñado piezas de hormigón prefabricado que se unirán en el mismo momento de la instalación sobre la fachada.

La idea de fabricar varias piezas en lugar de una sola viene motivada por la necesidad de obtener la mayor simplicidad a la hora de la construcción y la facilidad para transportar hasta el punto de instalación.

Por tanto, se muestran a continuación cada una de las partes que conforman la chimenea solar, con el fin de facilitar la comprensión del lector y la posterior fabricación del conjunto.

### 8.1.1 Soporte inferior para entrada de aire

Se trata de un bloque único por el que entrará el aire proveniente del interior del edificio hacia la chimenea solar, al estar sometido al efecto chimenea.

Dispone de una compuerta de apertura y cierre en contacto con el interior del edificio, y otra compuerta lateral en contacto con el sistema de ventilación auxiliar para activar el régimen de ventilación forzada si fuera necesario. Ambas compuertas idealmente estarán accionadas por un motor controlado a su vez por los sensores de temperatura anteriormente mencionados, o por el sistema electrónico adecuado.

Este soporte inferior estará en contacto directo con el suelo, por lo que será necesario añadir una pequeña capa de cemento u otro material que confiera solidez a la estructura. Además, el soporte deberá ser lo suficientemente resistente como para soportar el peso todo el conjunto.

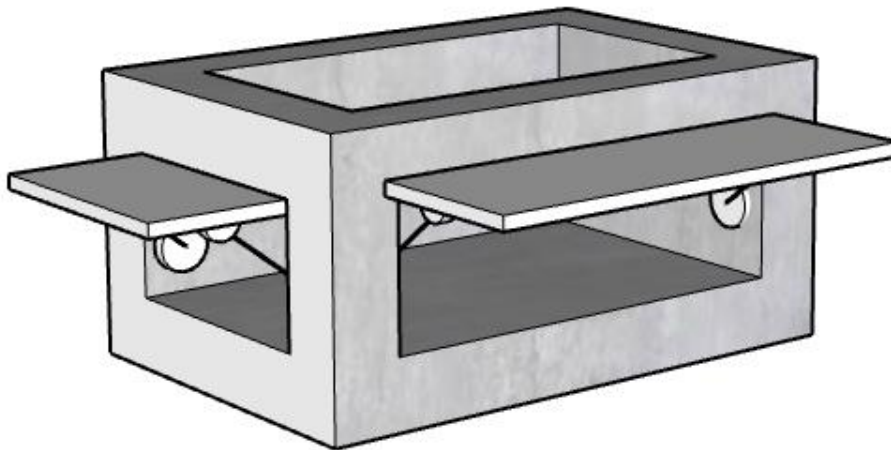


Figura 31. Soporte inferior para entrada de aire

### 8.1.2 Sistema de ventilación auxiliar

Como se ha comentado durante todo el trabajo, la chimenea solar pretende ser un sistema de ventilación pasiva que no precise de suministro de energía para ello. Pero como se indicaba de igual manera, podrán darse situaciones en las que no se produzca el intercambio energético, provocando entonces la no conducción de aire a través de la chimenea solar.

Esta situación indeseada que debe darse el menor tiempo posible solo puede ser solucionada mediante un sistema convencional de ventilación forzada. Con la idea de que no sea necesario realizar una instalación expresamente

para este cometido, se presenta un sistema de ventilación que pueda instalarse precisamente en el interior de la chimenea solar.

Los motores que accionan los ventiladores pueden estar controlados por los sensores citados anteriormente, o por otros instalados expresamente.

Se ha diseñado este bloque independiente del soporte inferior para la entrada de aire expresamente, pensando en que este no será necesario en los edificios que tengan ventilación suficiente con el mínimo régimen que ofrece la chimenea solar con convención natural. Tampoco será necesario este bloque en aquellos edificios que ya dispongan de un sistema de ventilación convencional, donde elementos instalados simultáneamente serían redundantes.

Además, en casos específicos en los que se busque un régimen de ventilación especialmente elevado, ambos mecanismos de ventilación (natural y forzada) podrán trabajar de manera conjunta para maximizar el caudal que circule por la chimenea solar.

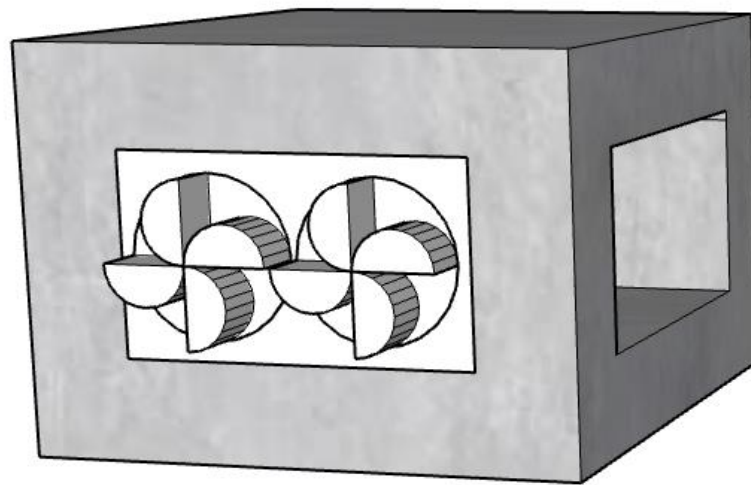


Figura 32. Sistema de ventilación

### 8.1.3 Soporte intermedio de unión con muro absorbedor

Permite la unión física entre el soporte inferior y el propio cuerpo del muro absorbedor con las aletas. Su fisionomía conduce de la mejor manera el aire hasta el último, aumentando ligera y progresivamente el área del conducto.

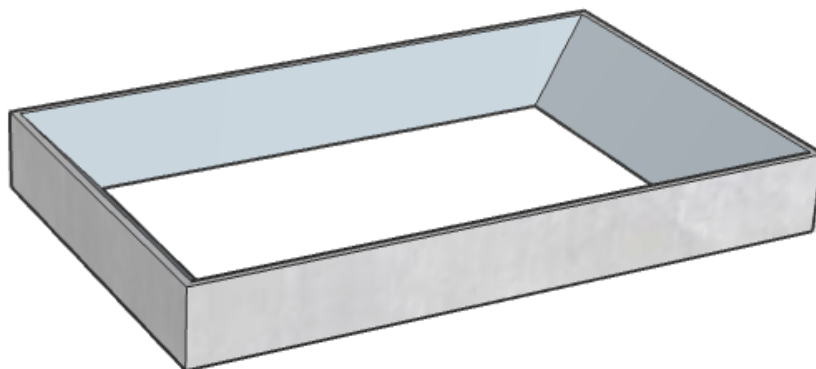


Figura 33. Soporte intermedio de unión con muro absorbedor

### 8.1.4 Cuerpo del muro absorbedor

Es el verdadero protagonista del todo el conjunto, donde se produce el intercambio de calor entre el aire procedente del interior del edificio y el bloque absorbedor. Cabe destacar de nuevo la importancia de las aletas, que aumenta considerablemente el área de contacto entre ambas superficies, maximizando el intercambio convectivo.

Como ya se ha demostrado, el muro absorbedor es el responsable de inducir el efecto chimenea que provoca el movimiento del aire.

En caso de que se precise de una mayor altura de este bloque, puede diseñarse expresamente o como alternativa más sencilla fabricar varias unidades, colocándose en serie durante la instalación. Esto último podría provocar un supuesto punto de pérdidas de calor (algo no muy problemático si se utiliza la junta adecuada, pero constituye un buen punto de actuación como junta de dilatación en momentos en los que el muro absorbedor esté sometido a altas temperaturas).

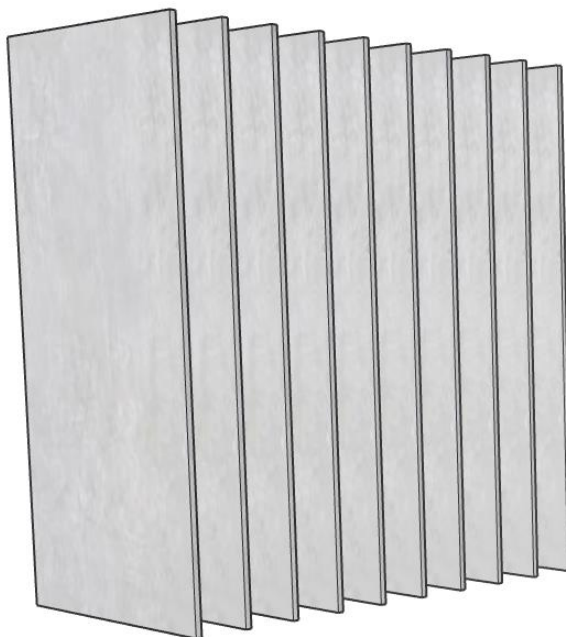


Figura 34. Cuerpo del muro absorbedor

Como también se ha indicado anteriormente, en aquellos edificios donde la propia fachada no sirva como aislamiento térmico entre chimenea y el interior, será necesario añadir una capa de separadora que evite la transmisión de calor entre ambas superficies.

### 8.1.5 Acristalamiento

Como se ha demostrado anteriormente, este componente tendrá una función crucial para maximizar la absorción de radiación del exterior para calentar el aire y en especial, el muro absorbedor.

Al igual que ocurre con el cuerpo del muro absorbedor, para dimensiones mayores puede dimensionarse un único vidrio, o instalar varios de estos unidos entre sí. Esto último podría provocar un supuesto punto de pérdidas de calor (algo no muy problemático si se utiliza la junta adecuada, pero constituye un buen punto de actuación como junta de dilatación en momentos en los que el muro absorbedor esté sometido a altas temperaturas)..

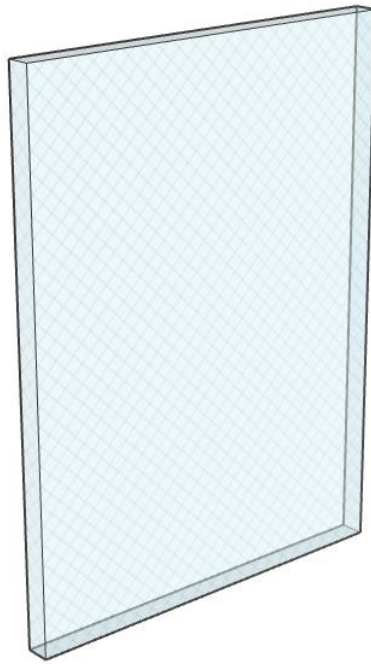


Figura 35. Acristalamiento

#### 8.1.6 Sistema de salida de aire

Se trata del bloque que permite la salida del aire. Tiene una fisionomía tal que permite la salida de aire a través de dos compuertas con funciones diferentes:

La compuerta superior permitiría la evacuación del aire caliente al exterior. Como forma de aprovechamiento adicional de este calor interno del aire y tal y como se señala en el apartado de la recuperación de calor, podría incluso instalarse un sistema de canalizaciones de agua que se calentara, agua que podría emplearse para uso doméstico.

La compuerta lateral tendría como salida el interior del propio edificio. Esto propiciaría que la chimenea solar sirviera como sistema de calefacción y no como sistema de ventilación pasiva, algo que puede ser interesante sobre todo durante los meses más fríos del año.

Como con el soporte inferior, estas compuertas estarían accionadas por de accionamiento controlados por sensores o sistemas lógicos.

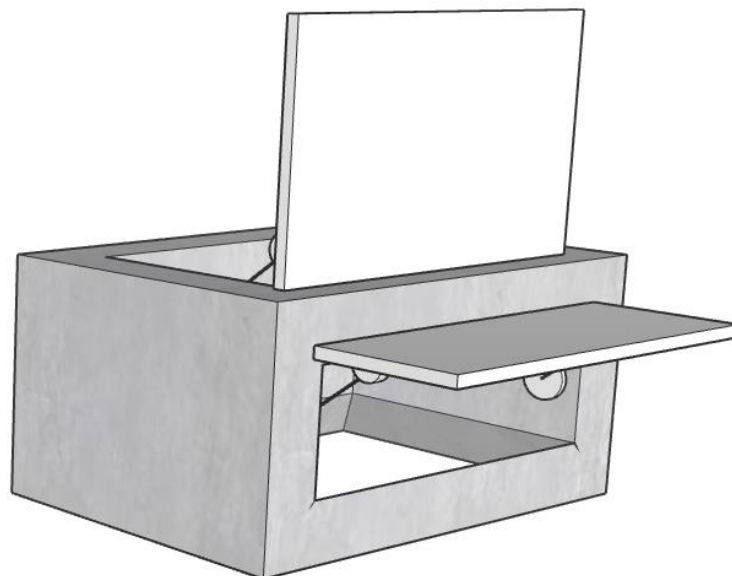


Figura 36. Sistema de salida de aire

### 8.1.7 Sistema de control y cableado

Para controlar el sistema de compuertas y el sistema de ventilación será necesario un sistema de control, que tendrá como inputs las distintas temperaturas existentes en la chimenea solar, caudales... que accionen las compuertas y los ventiladores según cada caso.

Para facilitar la accesibilidad y evitar sobrecalentamientos en los aparatos y las pérdidas por fricción indeseadas, se propone este sistema junto con las canaletas que contendrán los cables de conexión a cada componente en la parte exterior de la chimenea.

La instalación de las canaletas y la disposición de los conductores de baja tensión deberá realizarse según lo dispuesto en Reglamento Electrotécnico de Baja Tensión (REBT).

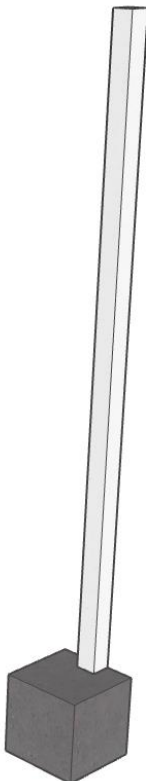


Figura 37. Sistema y de control y cableado

## 8.2 Unión entre componentes

Para la unión entre las piezas de hormigón prefabricado y de estas con el acristalamiento puede acudir a solución atornilladas como primera opción, algo que en primera instancia se descarta debido a posibles puntos de pérdidas de calor.

Se opta entonces por juntas de sellado junto con backer road para limitar la superficie de actuación en caso de ser necesario. Este sistema de unión hará las veces de juntas de dilatación entre las piezas, algo de crucial importancia para evitar el agrietamiento y rotura de los componentes.

## 8.3 Representación del conjunto

Se presentan a continuación algunas vistas tridimensionales del conjunto de la chimenea solar, mostrando de manera simultánea todos los componentes presentados en el apartado anterior:

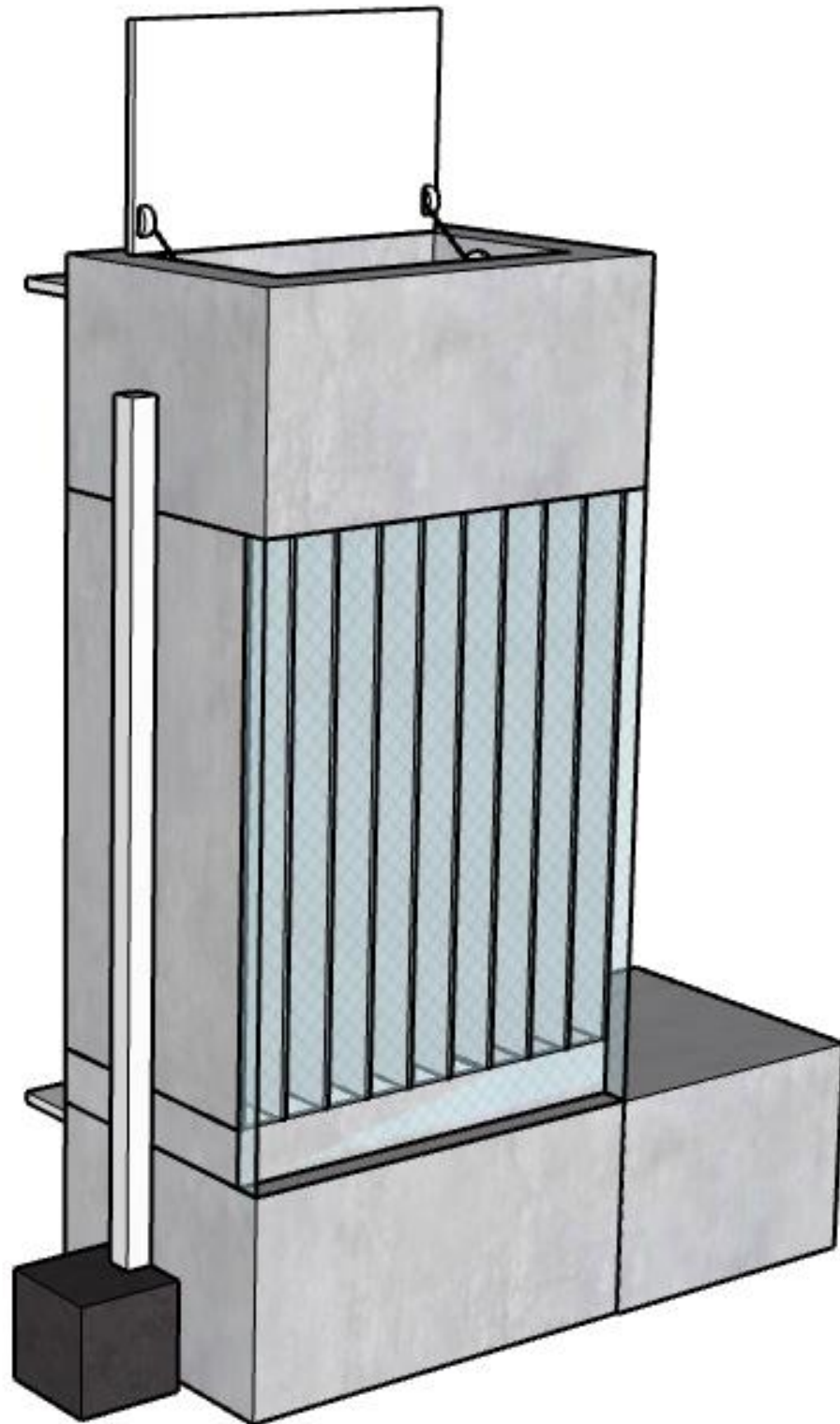


Figura 38. Vista frontal del modelo

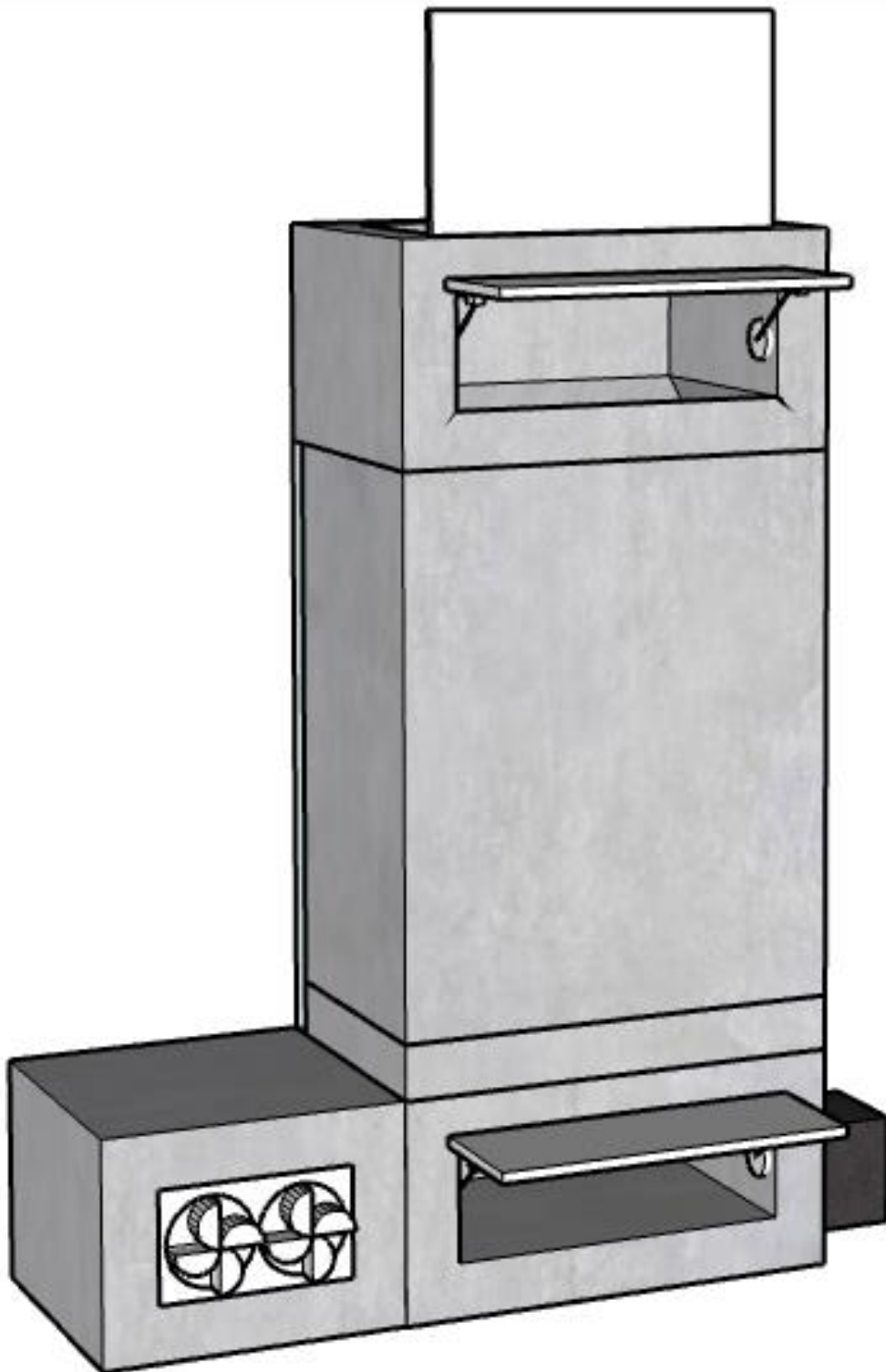


Figura 39. Vista trasera del modelo



Seguidamente se muestra el plano de despiece detallado del conjunto:

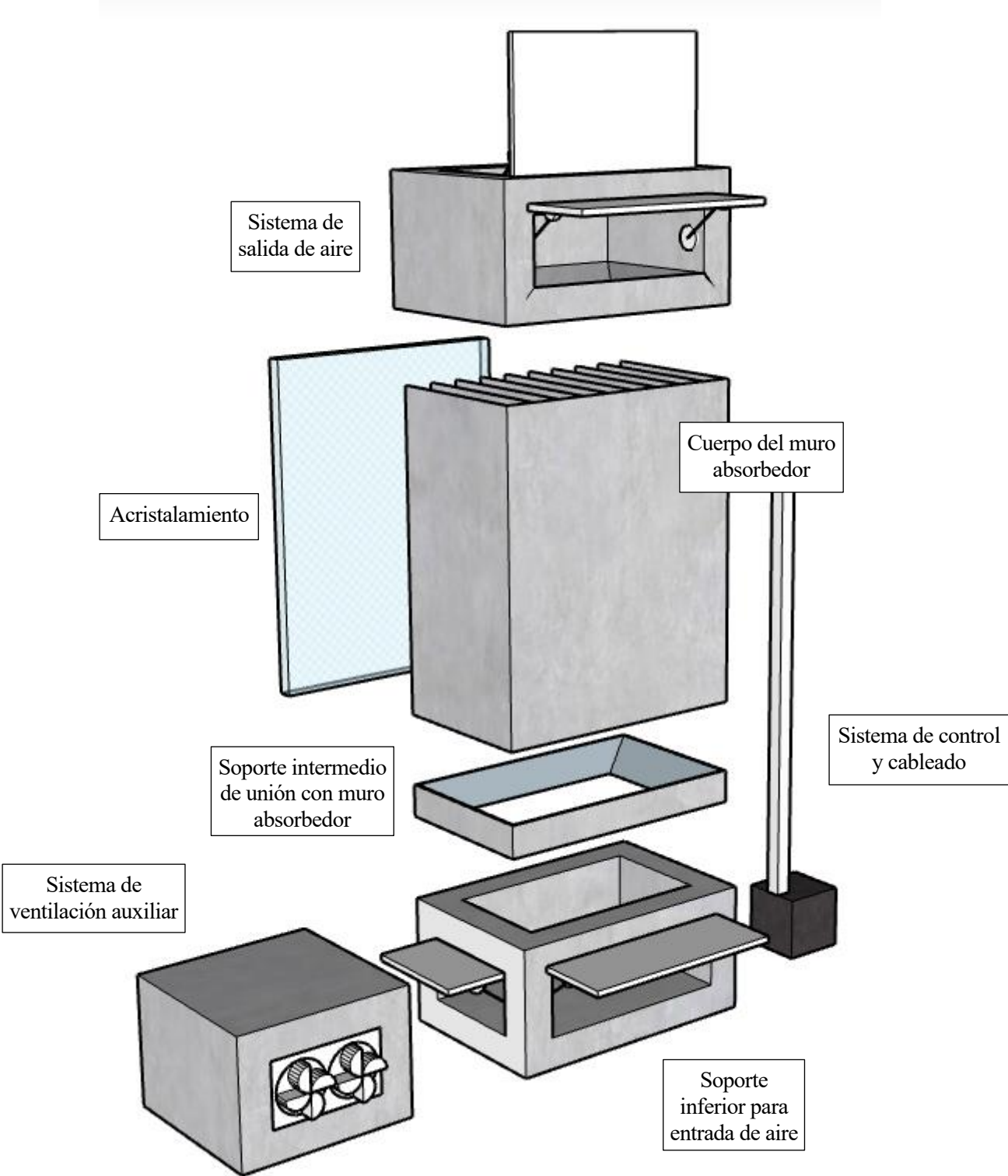


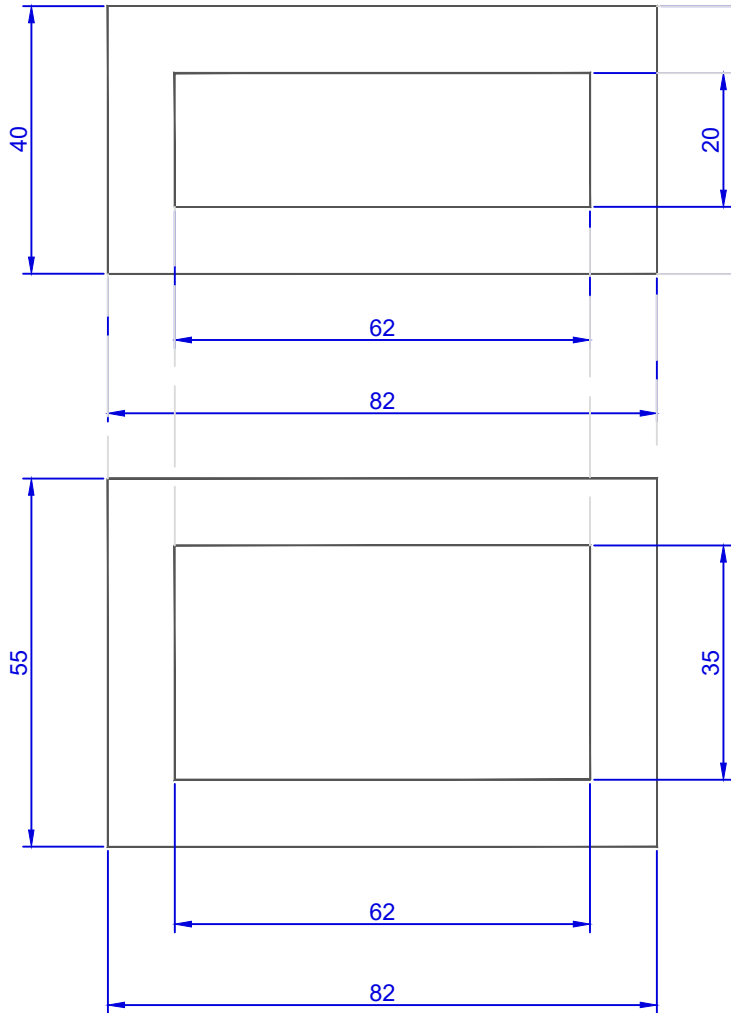
Figura 40. Plano de despiece del modelo

## **8.4 Planos de detalle**

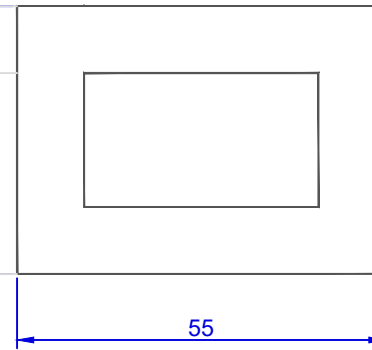
Finalmente se presentan los planos detallados con cada uno de los componentes que conforman la chimenea solar.

Destacar que no se detallarán las medidas de las compuertas de entrada y salida de aire ni del sistema de control y cableado, puesto que estos tendrán una longitud concreta en función del modelo disponible por el fabricante.

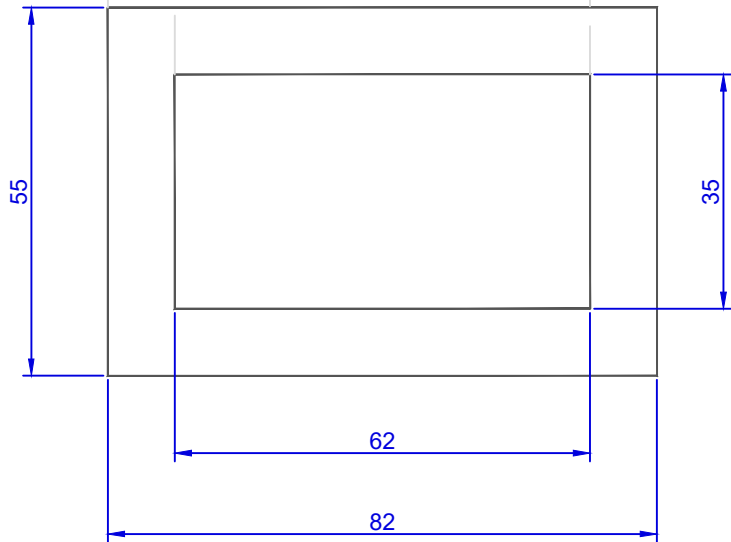
# ALZADO



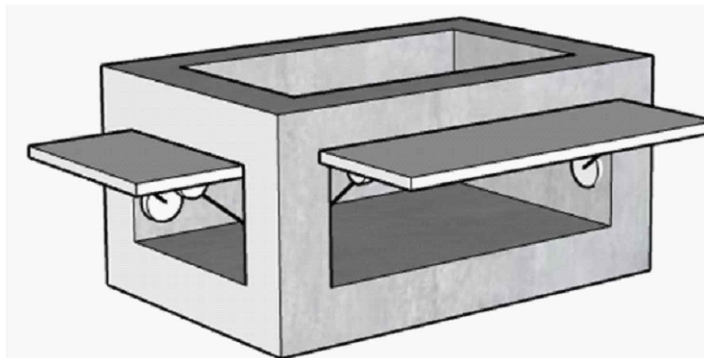
# PERFIL



# PLANTA



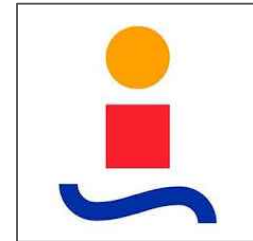
Las compuertas junto con las barras de soporte se definirán según modelo del fabricante



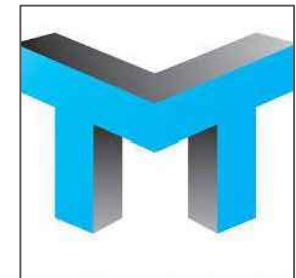
Universidad de Sevilla



Escuela Técnica Superior de Ingeniería



Grupo Termotecnia



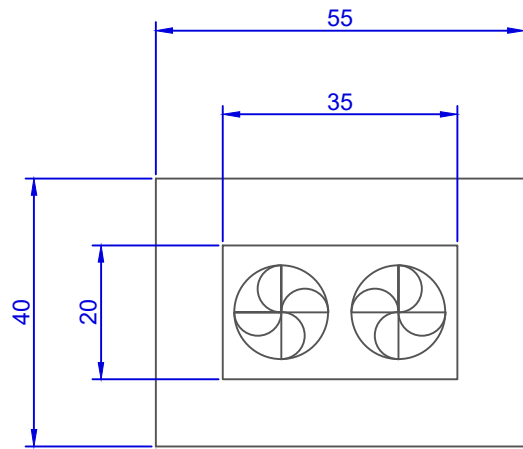
SOPORTE INFERIOR PARA ENTRADA DE AIRE


Versión	Fecha	Descripción	Emitido	Dibujado	Revisado	Aprobado
---------	-------	-------------	---------	----------	----------	----------

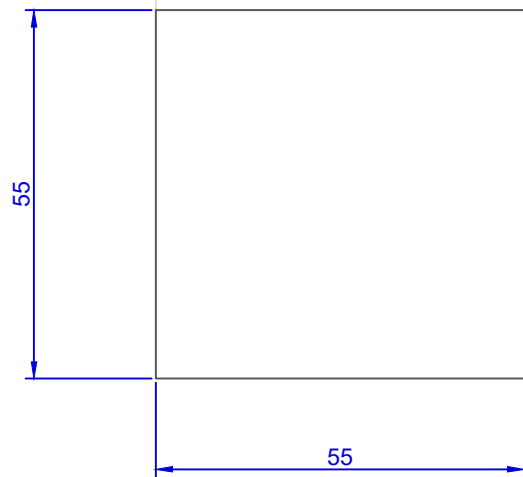
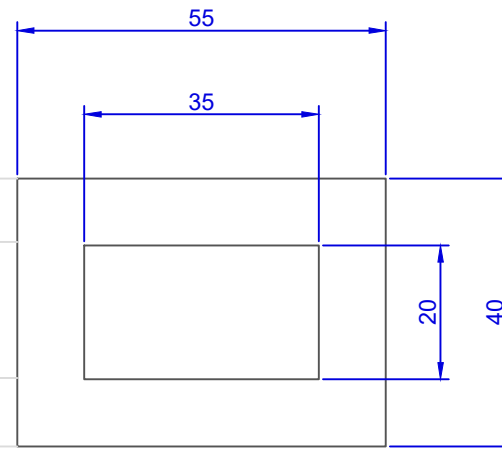
Proyecto: DISEÑO INNOVADOR DE CHIMENEA SOLAR PARA EDIFICIOS: ESTUDIO E INDUSTRIALIZACIÓN DEL DISEÑO  
 Tamaño: A4

Este plano es propiedad del Departamento de Termotecnia de la Universidad de Sevilla. No se puede reproducir, copiar, prestar, ceder o usar bajo ninguna circunstancia sin el previo consentimiento escrito del Propietario.

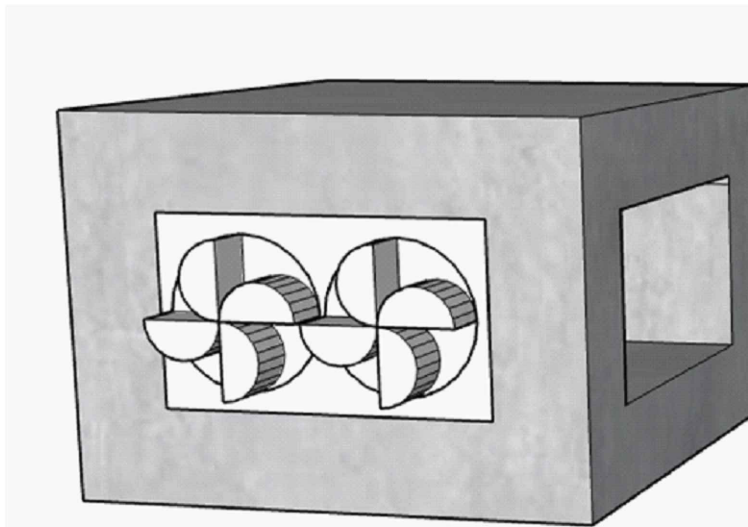
# ALZADO



# PERFIL



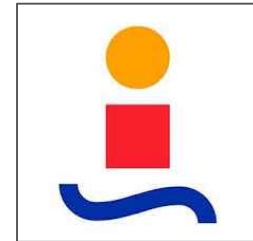
# PLANTA



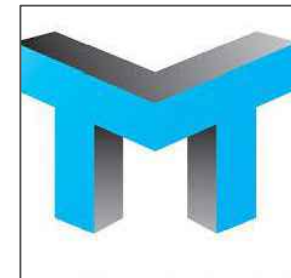
Universidad de Sevilla



Escuela Técnica Superior de Ingeniería



Grupo Termotecnia



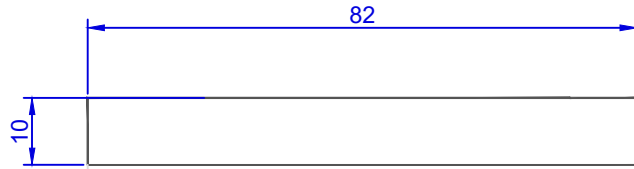
SISTEMA DE VENTILACIÓN AUXILIAR

Versión	Fecha	Descripción	Emitido	Dibujado	Revisado	Aprobado

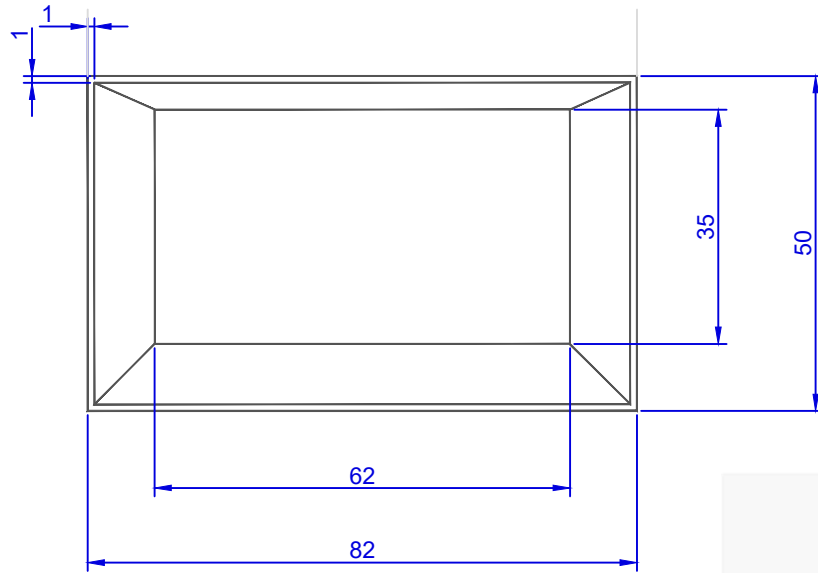
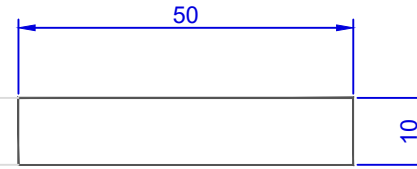
Proyecto: DISEÑO INNOVADOR DE CHIMENEA SOLAR PARA EDIFICIOS: ESTUDIO E INDUSTRIALIZACIÓN DEL DISEÑO  
 Tamaño: A4

Este plano es propiedad del Departamento de Termotecnia de la Universidad de Sevilla. No se puede reproducir, copiar, prestar, ceder o usar bajo ninguna circunstancia sin el previo consentimiento escrito del Propietario.

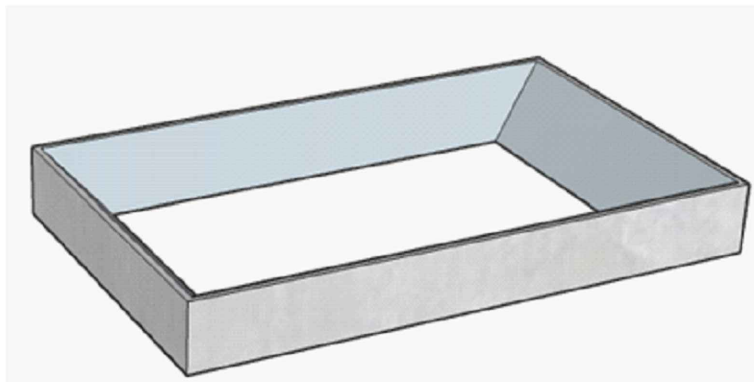
# ALZADO



# PERFIL



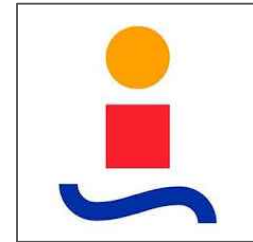
# PLANTA



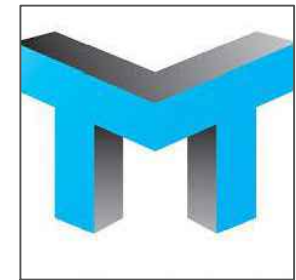
Universidad de Sevilla



Escuela Técnica Superior de Ingeniería



Grupo Termotecnia



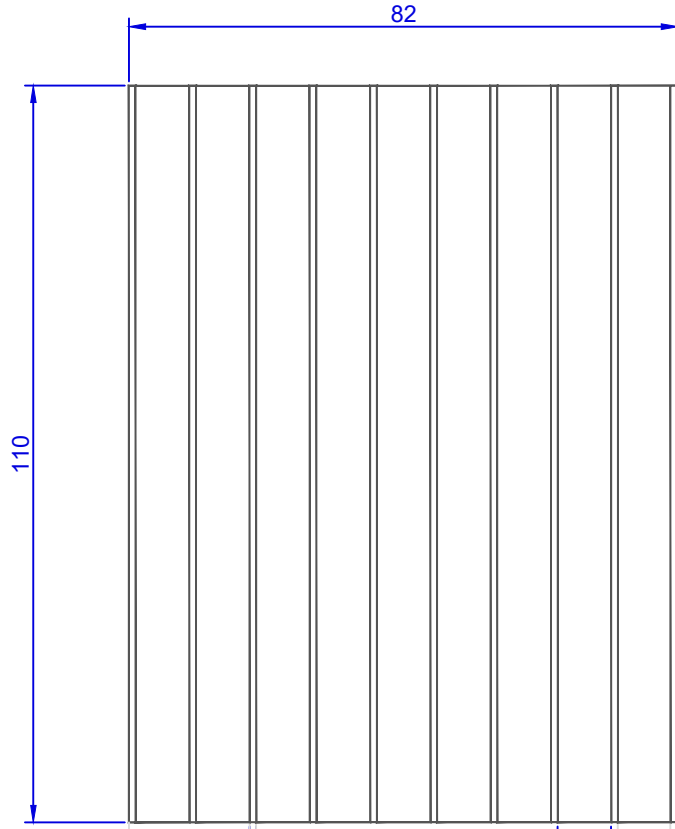
SOPORTE INTERMEDIO DE UNIÓN CON MURO ABSORBEDOR

Versión	Fecha	Descripción	Emitido	Dibujado	Revisado	Aprobado

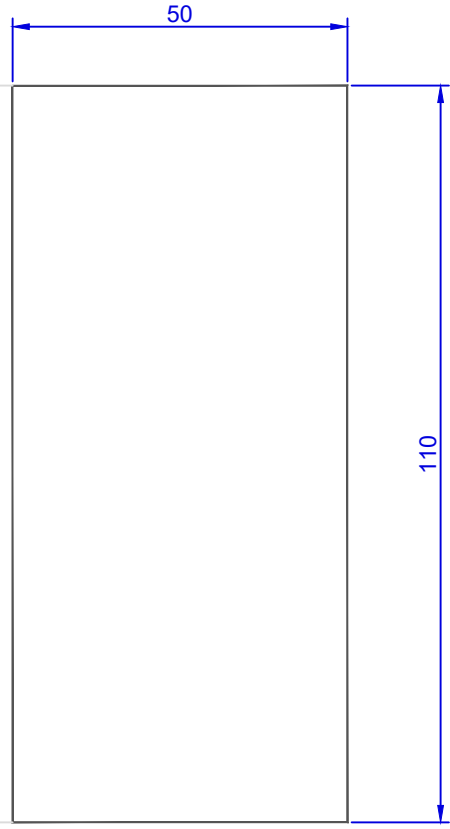
Proyecto: DISEÑO INNOVADOR DE CHIMENEA SOLAR PARA EDIFICIOS: ESTUDIO E INDUSTRIALIZACIÓN DEL DISEÑO  
 Tamaño: A4

Este plano es propiedad del Departamento de Termotecnia de la Universidad de Sevilla. No se puede reproducir, copiar, prestar, ceder o usar bajo ninguna circunstancia sin el previo consentimiento escrito del Propietario.

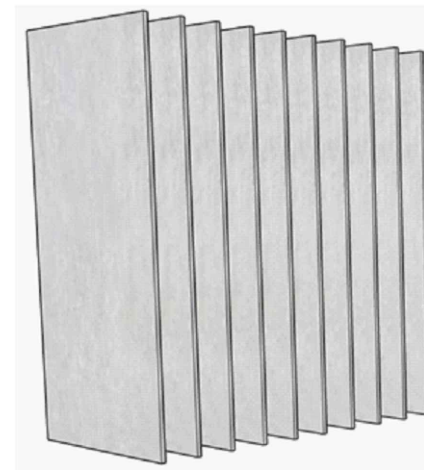
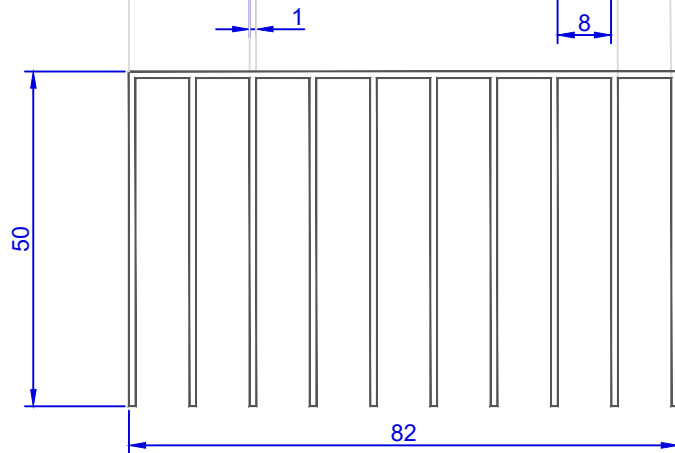
**ALZADO**



**PERFIL**



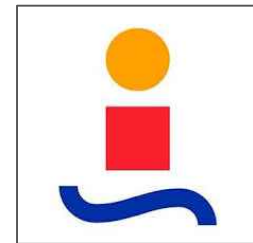
**PLANTA**



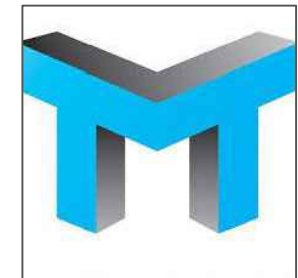
Universidad de Sevilla



Escuela Técnica Superior de Ingeniería



Grupo Termotecnia



**CUERPO DEL MURO ABSORBEDOR**

Versión	Fecha	Descripción	Emitido	Dibujado	Revisado	Aprobado

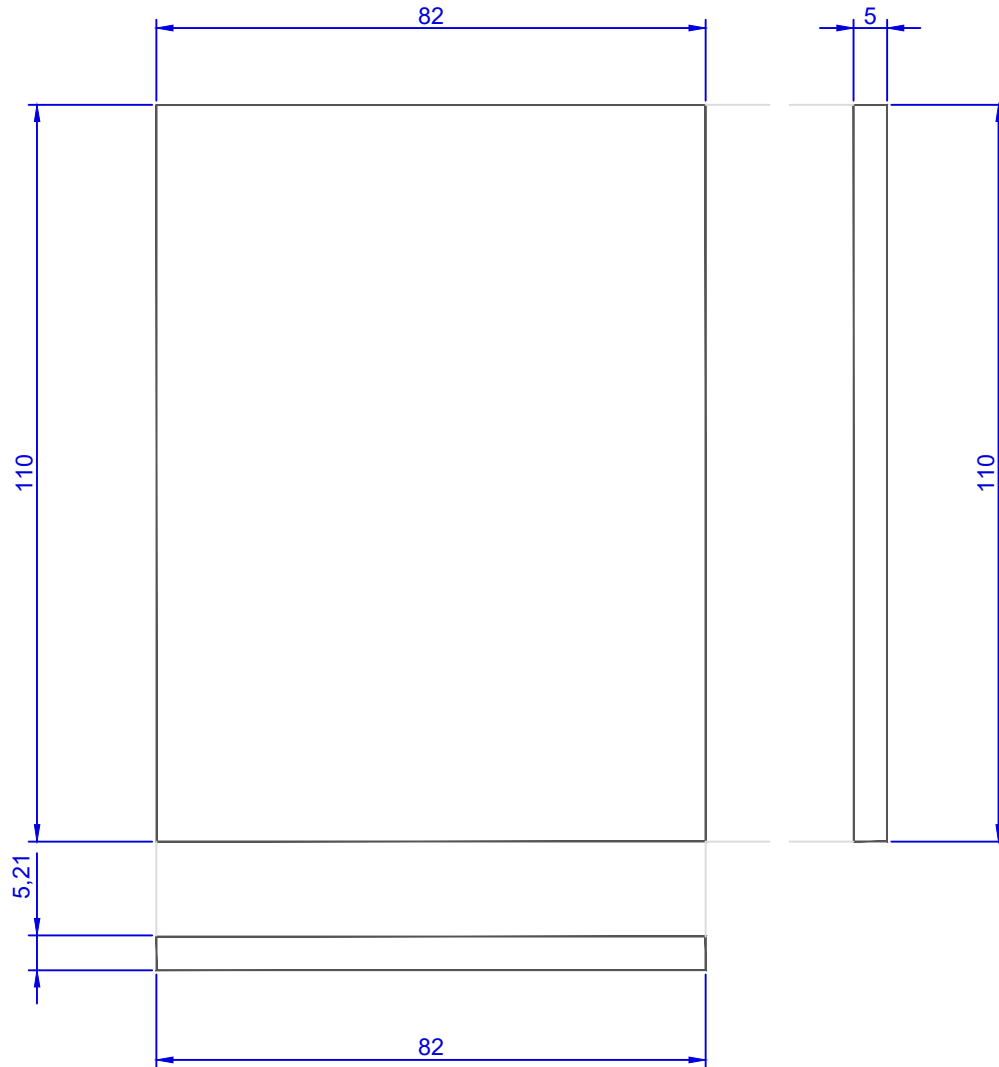
Proyecto: **DISEÑO INNOVADOR DE CHIMENEA SOLAR PARA EDIFICIOS: ESTUDIO E INDUSTRIALIZACIÓN DEL DISEÑO**

Tamaño: **A4**

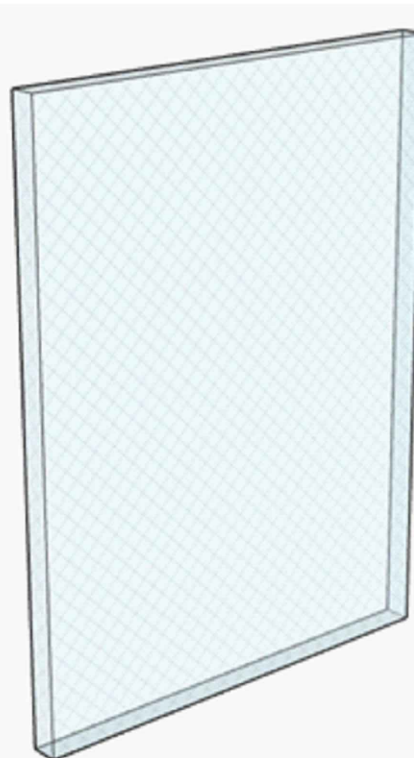
Este plano es propiedad del Departamento de Termotecnia de la Universidad de Sevilla. No se puede reproducir, copiar, prestar, ceder o usar bajo ninguna circunstancia sin el previo consentimiento escrito del Propietario.

# ALZADO

# PERFIL



El espesor del acristalamiento dependerá del modelo suministrado por el fabricante

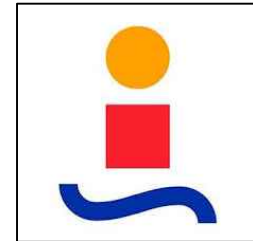


# PLANTA

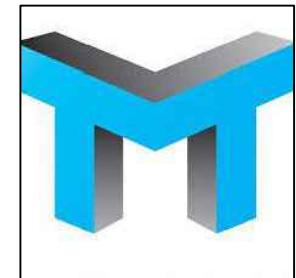
Universidad de Sevilla



Escuela Técnica Superior de Ingeniería



Grupo Termotecnia



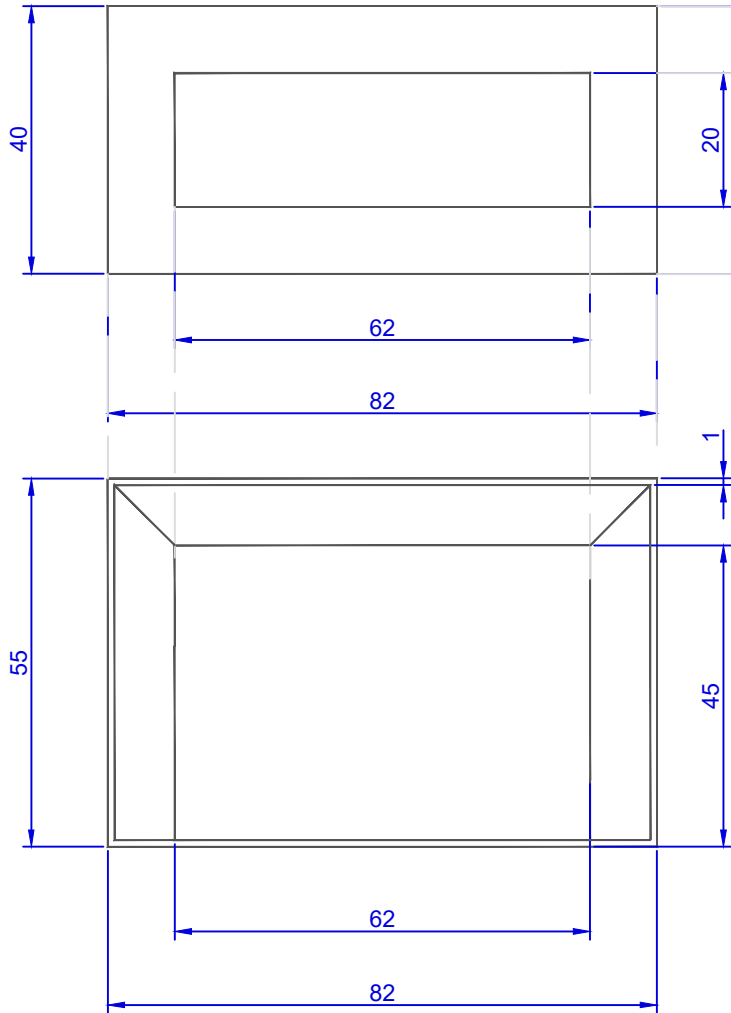
ACRISTALAMIENTO

Versión	Fecha	Descripción	Emitido	Dibujado	Revisado	Aprobado

Proyecto: DISEÑO INNOVADOR DE CHIMENEA SOLAR PARA EDIFICIOS: ESTUDIO E INDUSTRIALIZACIÓN DEL DISEÑO  
Tamaño: A4

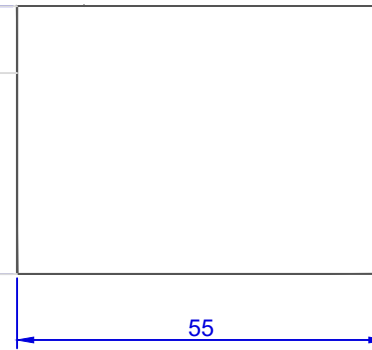
Este plano es propiedad del Departamento de Termotecnia de la Universidad de Sevilla. No se puede reproducir, copiar, prestar, vender o usar bajo ninguna circunstancia sin el previo consentimiento escrito del Propietario.

# ALZADO

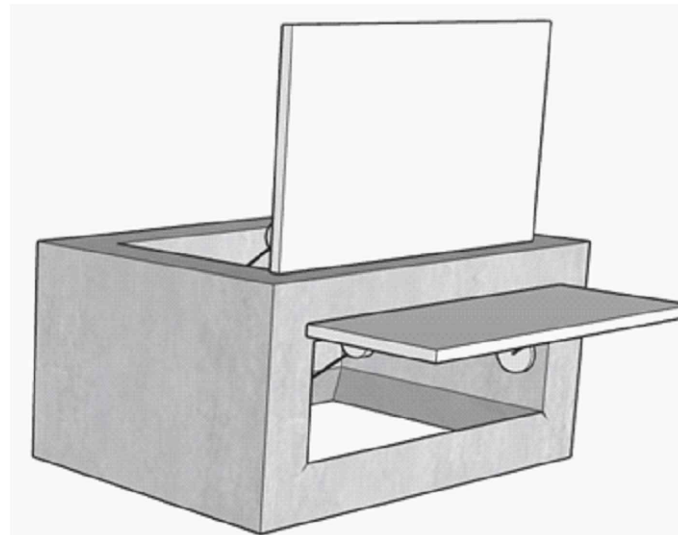


# PLANTA INFERIOR

# PERFIL



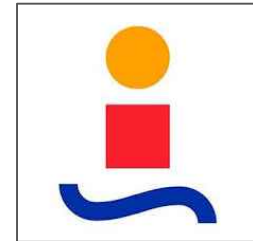
Las compuertas junto con las barras de soporte se definirán según modelo del fabricante



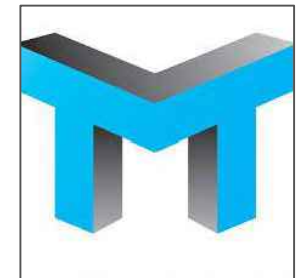
Universidad de Sevilla



Escuela Técnica Superior de Ingeniería



Grupo Termotecnia



SISTEMA DE SALIDA DE AIRE


Versión	Fecha	Descripción	Emitido	Dibujado	Revisado	Aprobado

Proyecto: DISEÑO INNOVADOR DE CHIMENEA SOLAR PARA EDIFICIOS: ESTUDIO E INDUSTRIALIZACIÓN DEL DISEÑO

Tamaño: A4

Este plano es propiedad del Departamento de Termotecnia de la Universidad de Sevilla. No se puede reproducir, copiar, prestar, ceder o usar bajo ninguna circunstancia sin el previo consentimiento escrito del Propietario.



# REFERENCIAS

---

- [1] Agencia Internacional de la Energía: «Global Energy Review: CO2 Emissions in 2021», 2021 doi: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/c3086240-732b-4f6a-89d7-db01be018f5e/GlobalEnergyReviewCO2Emissionsin2021.pdf>
- [2] United Nation Climate Change: «El Acuerdo de París», 2021 doi: <https://unfccc.int/es/acerca-de-las-ndc/el-acuerdo-de-paris>
- [3] Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía: «Consumo por usos del sector residencial», 2023 doi: <https://informesweb.idae.es/consumo-usos-residencial/informe.php>
- [4] Real Academia Española: «Eficiencia energética», 2012 doi: <https://dej-enclave2.rae.es/lema/eficiencia-energ%C3%A9tica>
- [5] J. C. León Vázquez, «La chimenea solar: parámetros de diseño de un sistema pasivo generador de movimiento de aire», 2016 doi: <http://hdl.handle.net/2117/115038>.
- [6] Mc. C. Guerrero Delgado, J. Sánchez Ramos, and S. Álvarez Domínguez, «Using the sky as heat sink: Climatic applicability of night-sky based natural cooling techniques in Europe» *Energy Convers. Manag.*, vol. 225, no. July, 2020, doi: 10.1016/j.enconman.2020.113424
- [7] EcoHabitat, «Hábitat regenerativo»: doi: <https://ecohabitat.org/arquitectura-bioclimatica-conceptos-y-tecnicas/>
- [8] María Teresa Baeza Romero, Doctorado por la Universidad de Castilla la Mancha: «La elevada contaminación del aire en el interior de los hogares activa las alarmas» doi: <https://theconversation.com/la-elevada-contaminacion-del-aire-en-el-interior-de-los-hogares-activa-las-alarmas-185451#:~:text=La%20Organizaci%C3%B3n%20Mundial%20de%20la,personas%20se%20produce%20en%20interiores.>
- [9] Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios (RITE): doi: <https://www.boe.es/buscar/act.php?id=BOE-A-2007-15820>
- [10] M. Santamouris, A. Sfakianaki, and K. Pavlou, «On the efficiency of night ventilation techniques applied to residential buildings»: doi: 10.1016/j.enbuild.2010.02.024.
- [11] Blondeau, M Spérandio, F Allard, «Night ventilation for building cooling in summer» doi: [https://doi.org/10.1016/S0038-092X\(97\)00076-5](https://doi.org/10.1016/S0038-092X(97)00076-5)
- [12] Irene Ortego Fernández, «Torres de viento. Relectura contemporánea de sistemas energéticos pasivos» doi: [https://oa.upm.es/57995/1/TFG\\_20\\_Ortego\\_Fernandez\\_Irene.pdf](https://oa.upm.es/57995/1/TFG_20_Ortego_Fernandez_Irene.pdf)
- [13] Teresa Rocío Palomo Amores, «Diseño innovador de chimenea solar para edificios: modelado y optimización»
- [14] C. S. Soria, «Modelización Cfd De Los Flujos De Calor Y Masa En Cámaras De Aire. Aplicación Al Cálculo De Coeficientes Convectivos Y Flujos De Aire En Fachadas Ventiladas» 2012.
- [15] G.S. Barozzi, M. S. E. Imbabi, E. Nobile, and A. C. M. Sousa, «Physical and numerical modelling of a solar chimney-based ventilation system for buildings» *Build. Environ.*, vol. 27, no. 4, pp. 433–445, 1992, doi: 10.1016/0360-1323(92)90042-N.
- [16] Bansal, N.K., Mathur, R., Bhandari, M.S. (1993); «Solar Chimney Stack Ventilation. Building and Environment» vol 28, pp. 373-377, 1993, doi: 10.1016/0360-1323(93)90042-2.
- [17] K.S. Ong, «A mathematical model of a solar chimney» *Renew. Energy*, vol. 28, no. 7, pp. 1047–1060, 2003, doi: 10.1016/S0960-1481(02)00057-5.
- [18] N. K. Bansal, J. Mathur, S. Mathur, and M. Jain, «Modeling of window-sized solar chimneys for ventilation» *Build. Environ.*, vol. 40, no. 10, pp. 1302–1308, 2005, doi: 10.1016/j.buildenv.2004.10.011.
- [19] J. Martí-Herrero and M. R. Heras-Celemin, «Dynamic physical model for a solar chimney» *Sol. Energy*, vol. 81, no. 5, pp. 614–622, 2007, doi: 10.1016/j.solener.2006.09.003.

- [20] K. H. Lee and R. K. Strand, «Enhancement of natural ventilation in buildings using a thermal chimney» *Energy Build.*, vol. 41, no. 6, pp. 615–621, 2009, doi: 10.1016/j.enbuild.2008.12.006.
- [21] L. P. Chung, M. H. Ahmad, D. R. Ossen, and M. Hamid, «Effective Solar Chimney Cross Section Ventilation Performance in Malaysia Terraced House» *Procedia - Soc. Behav. Sci.*, vol. 179, pp. 276–289, 2015, doi: 10.1016/j.sbspro.2015.02.431.
- [22] A. B. Kasaeian, S. Molana, K. Rahmani, and D. Wen, «A review on solar chimney systems» *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 67, pp. 954–987, 2017, doi: 10.1016/j.rser.2016.09.081.
- [23] A. T. Layeni, M. A. Waheed, B. A. Adewumi, B. O. Bolaji, C. N. Nwaokocha, and S. O. Giwa, «Computational modelling and simulation of the feasibility of a novel dual purpose solar chimney for power generation and passive ventilation in buildings» *Sci. African*, vol. 8, p. e00298, 2020, doi: 10.1016/j.sciaf.2020.e00298.
- [24] C. S. Soria, «Modelización Cfd De Los Flujos De Calor Y Masa En Cámaras De Aire. Aplicación Al Cálculo De Coeficientes Convectivos Y Flujos De Aire En Fachadas Ventiladas» 2012.
- [25] TECHNOLOGY READINESS LEVELS. TRLS, <https://www.mincotur.gob.es/publicaciones/publicacionesperiodicas/economiaindustrial/revistaeconomaiindustrial/393/notas.pdf>
- [26] R. Vargas-López et al., «Mathematical models of solar chimneys with a phase change material for ventilation of buildings: A review using global energy balance» *Energy*, vol. 170, pp. 683–708, 2019, doi: 10.1016/j.energy.2018.12.148.
- [27] Á. Ruiz-Pardo, «Ahorro energético mediante el uso de elementos de doble envolvente transparente opaco» Univ. Sevilla, 2008.
- [28] E. P. Sakonidou, T. D. Karapantsios, A. I. Balouktsis, and D. Chassapis, «Modeling of the optimum tilt of a solar chimney for maximum air flow» *Sol. Energy*, vol. 82, no. 1, pp. 80–94, 2008, doi: 10.1016/j.solener.2007.03.001.
- [29] Copernicus, «Aumento estimado de la temperatura en superficie a escala mundial por encima de los niveles de 1850 a 1900»: <https://www.epdata.es/datos/cambio-climatico-datos-graficos/447>
- [30] Ministerio de Comercio y turismo, <https://www.mincotur.gob.es/publicaciones/publicacionesperiodicas/economiaindustrial/revistaeconomaiindustrial/393/notas.pdf>
- [31] «El equilibrio térmico: uno de los objetivos de la normativa vigente», <https://www.siberzone.es/blog-sistemas-ventilacion/el-equilibrio-termico-uno-de-los-objetivos-de-la-normativa-vigente/>
- [32] José María Sánchez Marín, José María Lasheras, «Conocimiento de materiales»
- [33] Norma EN 13369-2004, «Reglas comunes para productos prefabricados de hormigón»
- [34] UNE-EN 1992-1-1:2013, «Proyecto de estructuras de hormigón. Parte 1-1: Reglas generales y reglas para edificación»