

Trabajo de Fin de Grado Ingeniería de la Energía

Ventilación cruzada como estrategia pasiva: evaluación de su impacto en la energética del edificio

Autora: María Teresa Cano Varela

Tutores: Servando Álvarez Domínguez, José Sánchez Ramos

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

Sevilla, 2023



Trabajo de Fin de Grado
Ingeniería de la Energía

Ventilación cruzada como estrategia pasiva: evaluación de su impacto en la energética del edificio

Autora:

María Teresa Cano Varela

Tutores:

Servando Álvarez Domínguez

José Sánchez Ramos

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

Trabajo de Fin de Grado: Ventilación cruzada como estrategia pasiva: evaluación de su impacto en la energética del edificio

Autor: María Teresa Cano Varela

Tutor: Servando Álvarez Domínguez,
José Sánchez Ramos

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

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2023

El Secretario del Tribunal

Agradecimientos

En primer lugar, agradecer a mi profesor Servando Álvarez por creer en mi propuesta desde el primer momento. Ha sido un honor para mí trabajar con él. Sin embargo, debo decir que este trabajo no se hubiese materializado sin todas las personas del departamento de Termotecnia que me han ayudado y han estado pendientes de mi trabajo, pero sin duda, en especial a mi profesora Teresa Rocío Palomo. Gracias de corazón por toda la implicación y el esfuerzo.

En segundo lugar, agradecer a mi abuela María Concepción Pairet Blasco por dejarme utilizar su casa como centro de experimentación y estar atenta día tras día de abrir las ventanas cuando era necesario. También a toda mi familia materna por prestarme la atención y ayuda que he necesitado durante el verano del 2023.

*María Teresa Cano Varela
Castilleja de la Cuesta, 2023*

Resumen

Existe la necesidad de reducir la demanda de energía de los edificios para poder asegurar entre otros objetivos, una independencia energética de los territorios, así como la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero. Esta reducción debe llevarse a cabo desde el profundo estudio y respeto por la cultura, el estilo de vida y la arquitectura vernácula de las diferentes comunidades.

En la región de Andalucía existen numerosos ejemplos de como conseguir estos objetivos utilizando recursos propios durante la construcción como son los patios o el uso de materiales masivos, como es el tapial, para conseguir una mayor inercia térmica. Junto a los elementos arquitectónicos, las condiciones operacionales como la ventilación nocturna o el adecuado control solar son de vital importancia y, además, son legado inmaterial de los habitantes que pueblan esta zona.

En este trabajo, se recoge de forma técnica los efectos que la aplicación de este conocimiento popular tiene sobre la mejora del confort térmico en una de las zonas más cálidas de la península Ibérica, como es Écija. Así se demuestra que el hecho de abrir las ventanas por la noche reduce hasta en 6 °C la temperatura de las estancias durante el día, que los patios son oasis climáticos en el corazón de las viviendas o que la oscuridad típica de las casas antiguas de pueblo es una fantástica técnica de reducción de la demanda de energía en edificios.

Abstract

It exists the need of reducing the energy demand in buildings in order to achieve, among other goals, the energy independence of the territories, as well as the effects of greenhouse gas emissions. This decrease should be carried out from the deep study and respect for the culture, the lifestyle and the vernacular architecture of the different communities.

In the region of Andalucía, there are several examples on how to reach these goals by using own resources during the construction phase like *patios* or the use of massive materials as the rammed earth, to get a higher thermal inertia. Together with the architectural elements, the operational conditions as the night ventilation or the proper solar control are significantly valuable and also, inhabitants' immaterial legacy.

The aim of this Bachelor's Degree Final Project is to show in a technical way the effects that the application of this know-how has for the thermal comfort improvement in one of the hottest zones in the whole Iberian Peninsula, as Écija is. Thus, it is shown that the fact of open the windows during nighttime decreases up to 6°C the temperature during daytime, that the patios are climatic oasis in the heart of the dwellings or that the typical darkness of ancient town houses is a fantastic technique to reduce the energy demand in buildings.

Agradecimientos	7
Resumen	9
Abstract	11
Índice	13
Índice de Figuras	14
Índice de Ilustraciones	15
Notación	16
1 Introducción	17
2 Descripción del entorno de trabajo y experimentación	23
2.1. <i>Descripción del entorno de trabajo</i>	23
2.1.1 Entorno en el que se sitúa la casa	23
2.1.2 Descripción de la casa	26
2.2. <i>Descripción de los experimentos</i>	29
2.1.1 Instrumentos de medida	29
2.1.2 Campaña de monitorización	30
2.1.3 Experimentos para evaluar la ventilación nocturna	36
2.1.4 Datos climáticos coincidentes	38
3 Análisis cualitativo	40
3.1 <i>Resultados de la campaña de monitorización</i>	40
3.1.1 Primera planta. Oficina exterior (Sensor 2)	40
3.1.2 Primera planta. Oficina interior (Sensor 3)	41
3.1.3 Primera planta. Entrada patio (Sensor 4)	41
3.1.4 Segunda planta. Ventana (Sensor 6)	42
3.1.5 Segunda planta. Salón (Sensor 9)	43
3.1.6 Segunda planta. Habitación fachada (Sensor 10)	45
3.2 <i>Discusión de los resultados</i>	48
3.2.1 Comparación oficina interior con otras habitaciones	48
3.2.2 Comparación entrada patio con ventana	49
3.2.3 Comparación habitación fachada con salón	51
4 Análisis cuantitativo	52
4.1 <i>Validación de las características y condiciones operacionales</i>	52
4.1.1 Períodos de validación sin ventilación	52
4.1.2 Período de validación con ventilación	55
4.2 <i>Eficiencia de la ventilación</i>	55
5 Conclusión	59
Referencias	61
Anexos	63

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Demanda por fuente de energía y por uso final de la energía del sector de la edificación a nivel mundial en diferentes escenarios, desde 2022 a 2050. Fuente: IEA	18
Figura 2: Distribución del consumo de energía de los hogares en la vivienda en España. Fuente: IDAE	19
Figura 3: Temperatura a nivel de calle medida en la oficina y temperatura exterior	40
Figura 4: Temperatura interior medida en el interior de la oficina y temperatura exterior	41
Figura 5: Temperatura interior medida en la entrada del patio y temperatura exterior	42
Figura 6: Temperatura interior medida en la ventana y temperatura exterior	42
Figura 7: Temperatura interior medida en el salón y temperatura exterior	43
Figura 8: Período 8-11 de julio en salón	43
Figura 9: Período 14 -17 de julio en salón	44
Figura 10: Período 20-27 de julio en salón	44
Figura 11: Período 27 de julio – 3 de agosto en salón	45
Figura 12: Temperatura interior medida en la habitación fachada y temperatura exterior	46
Figura 13: Período 8-11 de julio en habitación fachada	46
Figura 14: Período 14-17 de julio en habitación fachada	47
Figura 15: Período 20-27 de julio en habitación fachada	47
Figura 16: Período 27 de julio – 3 de agosto en habitación fachada	48
Figura 17: Comparación oficina interior con otras habitaciones	49
Figura 18: Comparación ventana de la planta segunda con entrada patio	50
Figura 19: Comparación habitación fachada con salón	51
Figura 20: Validación sin ventilación agosto oficina	53
Figura 21: Validación sin ventilación agosto habitación	53
Figura 22: Validación sin ventilación septiembre oficina	54
Figura 23: Validación sin ventilación septiembre habitación	54
Figura 24: Validación con ventilación	55
Figura 25: Comparación influencia de la ventilación	56
Figura 26: Comparación influencia de la ventilación y temperatura exterior	56
Figura 27: Comparación influencia de la ventilación extendida	57
Figura 28: Comparación de la influencia de la ventilación 28 julio	58

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1: Patio de las Doncellas en el Alcázar de Sevilla. Fuente: Real Alcázar de Sevilla	20
Ilustración 2: Patio de los Leones en la Alhambra de Granada. Fuente: Patronato de la Alhambra y el Generalife	20
Ilustración 3: Posición de Écija en España y en Sevilla. Autores de las imágenes HansenBCN y Miguillen	24
Ilustración 4: Mapa meteorológico de la temperatura media en julio en Andalucía. Fuente: AEMET	24
Ilustración 5: Mapa meteorológico de la temperatura media en julio en Andalucía. Fuente: AEMET	25
Ilustración 6: Vista I de la calle Ancha, Écija. Fuente: Google Earth	25
Ilustración 7: Vista II de la calle Ancha, Écija. Fuente: Google Earth	25
Ilustración 8: Patio central	26
Ilustración 9: Hoja de la ventana y su contraventana cerrada	27
Ilustración 10: Detalle protección solar balcón y ventanas fachada planta superior.	27
Ilustración 11: Vista del toldo desplegado desde la planta alta	27
Ilustración 12: Zonas de análisis de la planta baja	28
Ilustración 13: Zonas de análisis de la planta alta	28
Ilustración 14: Vista de la cubierta desde la azotea de la tercera planta	29
Ilustración 15: Sensor Omega OM-EL-USB-2-LCD	29
Ilustración 16: Estación Meteorológica PCE-FWS 20N	29
Ilustración 17: Sensor Elitech RC-5 USB	30
Ilustración 18: Anemómetro PCE-ADL 11	30
Ilustración 19: Posición del sensor 1	31
Ilustración 20: Posición del sensor 2	31
Ilustración 21: Posición del sensor 3	32
Ilustración 22: Posición del sensor 4	32
Ilustración 23: Posición del sensor 5	33
Ilustración 24: Posición sensor 6	33
Ilustración 25: Posición sensor 7	34
Ilustración 26: Posición del sensor 8	34
Ilustración 27: Posición del sensor 9	35
Ilustración 28: Posición del sensor 10	35
Ilustración 29: Posición Estación Meteorológica	36
Ilustración 30: Puertas y ventanas abiertas zona oeste segunda planta	36
Ilustración 31: Instalación de alambre e hilos para experimento sentido de la corriente de aire	38

IEA	International Energy Agency
STEPS	Stated Policies Scenario
APS	Announced Pledges Scenario
NZE	Net Zero Emissions
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
UE	Unión Europea
IDAE	Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía
UNESCO	United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization
AEMET	Agencia Estatal de Meteorología
PGOU	Plan General de Ordenación Urbana
HULC	Herramienta Unificada Líder Calener

1 INTRODUCCIÓN

*"Aire aire
Pasa pasa
Que tenga la puerta abierta
La alegría pa' mi casa."
Aire, José Mercé (2000)*

LA demanda de energía primaria total en el sector de la edificación, se ha incrementado en la última década en una media de un 1% al año, alcanzando los 133 EJ en 2022 (IEA, 2023). La IEA, en su informe World Energy Outlook del año 2023, describe distintos escenarios sobre la demanda de energía primaria en el sector de la edificación. El primero de ellos es el denominado STEPS que aporta una visión basada en las últimas medidas tomadas por parte de los gobiernos en materia de energía y sostenibilidad. El segundo es el APS que ilustra hasta qué punto las ambiciones y objetivos presentados por los gobiernos pueden reducir las emisiones hasta el punto de conseguir el objetivo de cero emisiones netas para 2050. Este escenario incluye las propuestas presentadas y asume que estos objetivos se cumplirán en el tiempo establecido. Por último, se incluye el NZE que es una visión normativa que traza una hoja de ruta para alcanzar el objetivo de cero emisiones netas de dióxido de carbono para 2050. En la Figura 1 se muestra el escenario STEPS como el más desfavorable, tanto en demanda por fuente de energía, como en demanda por uso final de la energía, seguido por el APS, como el caso intermedio, pero muy lejos del escenario que marca el ritmo para conseguir los objetivos que es NZE. Todos ellos, sin embargo, asumen un aumento de la demanda energética debido a que se supone un crecimiento de la población y no solo eso, un aumento del parque edificatorio y, por tanto, de las personas que serán propietarias de una vivienda. Es por ello que, el sector de la edificación debe contribuir de manera inmediata a la reducción de esta demanda con medidas de ahorro y eficiencia que se tengan en cuenta desde el momento en el que los edificios son diseñados.

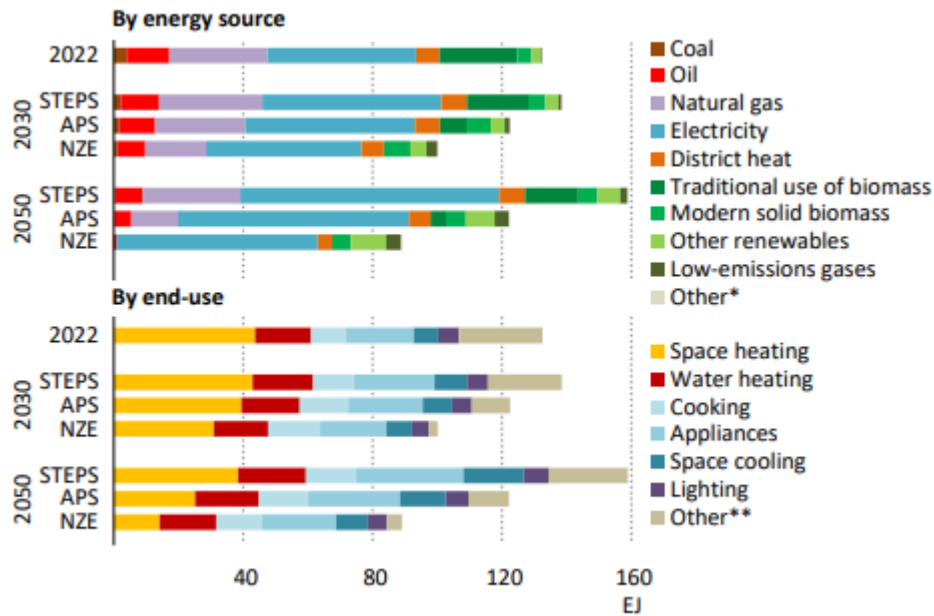


Figura 1: Demanda por fuente de energía y por uso final de la energía del sector de la edificación a nivel mundial en diferentes escenarios, desde 2022 a 2050. Fuente: IEA

Es realmente interesante detenerse en la demanda de energía que supone el acondicionamiento de los espacios para el régimen de refrigeración. En todos los escenarios que se presentan, aumenta la demanda de este servicio, mientras que la demanda energética en el régimen de calefacción disminuye en todos los escenarios, debido a medidas como la proliferación de bombas de calor, entre otras. Sin embargo, parece que, al incrementarse la demanda de energía por razones poblacionales, especialmente en África y las regiones de Asia Pacífico, la demanda de acondicionamiento en régimen de refrigeración aumentará ya que las regiones mencionadas están localizadas en latitudes cuyos climas son cálidos y húmedos. Para que esta demanda no se dispare como lo hace en el escenario STEPS para el 2050, es imperativo trabajar en soluciones arquitectónicas vernáculas ya que la sociedad de un país desarrollado, que desconoce el clima y la forma de vida de los habitantes de un país distinto al suyo y que está localizado en otro punto geográfico de la Tierra, no debe obviar toda la sabiduría de la que los habitantes locales han hecho uso durante siglos. Estos países desarrollados, no pueden pretender instalar sus tecnologías y formas de vida en lugares que no conocen, porque más tarde o más temprano, fracasarán en su tarea. En este Trabajo de Fin de Grado se pretende dar forma científico-técnica a una sabiduría que durante siglos y siglos se ha ido perfeccionando, pues ha bebido de las diferentes culturas que han ocupado lo que hoy en día es la Comunidad Autónoma de Andalucía, en el sur de España. Estas técnicas han proliferado porque han resultado útiles en su función y han sabido adaptarse a la vida de los habitantes de la región, así como ellos han desarrollado hábitos que les permitían tener un mayor confort en sus hogares. El culmen de toda esta tecnología se alcanza cuando la arquitectura y la forma de vida se plasma en la música, en la pintura o en fiestas tradicionales que son Patrimonio Cultural Inmaterial de la Humanidad como son los Patios de Córdoba (UNESCO, 2012).

Siendo conscientes de la importancia de poner en valor este saber vernáculo, la Unión Europea trabaja desde el año 2022 en el proyecto *New European Bauhaus*, (Unión Europea, 2023) bajo el lema “*beautiful, sustainable, together*”, que impulsa el desarrollo de un proyecto trascendental en el ámbito de la edificación que tenga en cuenta que las construcciones deben ser enriquecedoras estando inspiradas en el arte y la cultura, siempre respondiendo a las necesidades a través de la funcionalidad; deben ser sostenibles, en armonía con la naturaleza, el medioambiente y nuestro planeta y por último, deben ser inclusivas, convocando al diálogo entre culturas, disciplinas, géneros y edades. De manera inequívoca, es el último punto el que es fuente de inspiración para este trabajo. Se pretende que la arquitectura típica andaluza proporcione una respuesta a los retos en los que Europa y el mundo entero se verán inmersos en los próximos años a consecuencia del incremento de la temperatura media del planeta (IPCC, 2023), gracias al estudio y posterior integración de los elementos que la caracterizan, en la edificación del futuro. Otro de los pilares que constituirá la edificación del futuro es la rehabilitación de los edificios. El ritmo de renovación de edificios tiene que aumentar ya que el parque inmobiliario existente constituye el sector con mayor potencial de ahorro de energía. Además, los edificios son cruciales para alcanzar el objetivo de la Unión Europea de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero entre un 80 % y un 95% para 2050 respecto a 1990 (UE, 2012). Desde la unidad social que es la Unión Europea, los países del sur y,

sobre todo, aquellas regiones con climas más cálidos comparten su conocimiento y saber hacer con el resto de los países miembros, siempre bajo las líneas que propone el proyecto *New European Bauhaus*.

Es precisamente España, uno de esos países que por la latitud en la que se encuentra, cuenta con regiones especialmente expuestas a las altas temperaturas. Se estima que el consumo de energía final del sector edificación en España ascendió en el año 2005 a 18.123 ktep, lo que representa el 17% del consumo de energía final (106.940 ktep). De estos consumos, 10.793 ktep correspondieron al consumo energético del sector doméstico, lo que representa un 10% del consumo energético nacional. El consumo de energía final en el sector doméstico se distribuye para una vivienda media como se puede observar en la Figura 2.

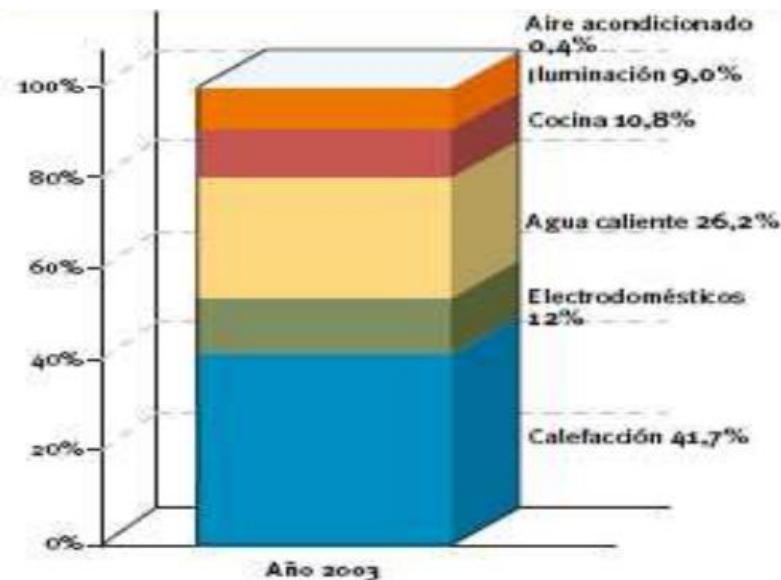


Figura 2: Distribución del consumo de energía de los hogares en la vivienda en España. Fuente: IDAE

El peso del aire acondicionado, dada su estacionalidad, no alcanza a fecha de 2007 valores de consumo importantes, aunque contribuye a generar picos de demanda eléctrica que contribuyen a ocasionar problemas locales en la continuidad del suministro eléctrico en los periodos de verano en que se alcanzan las temperaturas exteriores más altas (IDAE, 2007). De esta información se extraen varias problemáticas. La primera de ellas es el importante peso que tiene dentro del cómputo total del consumo de energía a nivel nacional el sector edificatorio, por lo que se debe prestar especial atención en este campo durante el diseño y la operación para reducir, a nivel nacional, el consumo de energía final. La segunda, es que el uso de aire acondicionado en periodos estacionales introduce un nuevo desafío en el sistema eléctrico puesto que los equipos de climatización requieren de una alta potencia instalada en el hogar. Una generalización de una alta potencia instalada en los hogares también es una generalización de la alta potencia que el país en conjunto debe instalar para hacer frente a estos picos estacionales de demanda. Por otra parte, en el sector no residencial español, existen tres usos que suponen el 87% del consumo de toda la energía del sector: refrigeración (30%), calefacción (29%) e iluminación (28%). La ofimática (4%) y el agua caliente sanitaria (3%) le siguen a gran distancia. En este caso, la refrigeración representa la contribución más alta al consumo de energía, puesto que estos edificios tienen unas cargas térmicas elevadas como son la alta ocupación, la presencia de equipos informáticos y lumínicos o incluso la búsqueda de un mayor confort, bien para potenciar el rendimiento de los trabajadores o bien, para incrementar las compras.

Para poder ofrecer conclusiones más detalladas que constituyan un marco no solo teórico si no también experimental, este Trabajo de Fin de Grado, propone el estudio de una vivienda localizada en la provincia de Sevilla, en la Comunidad Autónoma de Andalucía. La elección de esta vivienda como centro experimental se realiza puesto que la autora del trabajo reconoce en su propia experiencia como las condiciones que se alcanzan en verano en el interior de la vivienda, son condiciones de confort pese a la inexistencia de equipos de climatización y las duras condiciones climatológicas en el lugar en el que se localiza la vivienda.

En una observación preliminar, alguno de los elementos constructivos que se reconocen como propios de la arquitectura tradicional andaluza es el uso de patios interiores, elemento que se reconoce también en importantes monumentos en la región andaluza como es El Patio de las Doncellas en el Alcázar de Sevilla, en la Ilustración 1, Patrimonio de la Humanidad de la UNESCO (UNESCO, 1987).



Ilustración 1: Patio de las Doncellas en el Alcázar de Sevilla. Fuente: Real Alcázar de Sevilla

Otro magnífico ejemplo es el Patio de los Leones, en la Alhambra de Granada, también Patrimonio de la Humanidad de la UNESCO (UNESCO, 1984), que se puede observar en la Ilustración 2.



Ilustración 2: Patio de los Leones en la Alhambra de Granada. Fuente: Patronato de la Alhambra y el Generalife

Ambos monumentos datan del siglo XIV, durante el período de ocupación islámica, y comparten elementos comunes como son la presencia de fuentes en el centro de estos patios, soportales alrededor que protegen de la radiación del Sol, entre otras inclemencias del tiempo, o la presencia de vegetación en el caso del Patio de las Doncellas. No cabe ninguna duda de que estos elementos que se incluían en residencias de lujo o palacios también se replicarían en viviendas familiares de forma más modesta pero con la misma finalidad.

Los patios son una de las estrategias de diseño vernáculas más antiguas, con un origen histórico de hace 5000 años. Tradicionalmente, los patios están asociados con la cultura de Oriente Medio, aunque ha sido reinterpretado en Latinoamérica, China y Europa. Desafortunadamente, aunque los patios hayan jugado un papel único en la historia de la arquitectura como un modificador del microclima, durante los siglos más recientes, han sido injustamente subestimados. El efecto de los patios como una estrategia de diseño pasivo se pone de manifiesto por una parte en el confort de los ocupantes y, por otra parte, en el comportamiento energético del edificio (Amir Tabadkani, 2022). Más específicamente en Andalucía, los edificios populares se definen como de arquitectura cóncava ya que todos los espacios en la casa tienden a converger en el interior de esta, donde normalmente hay un patio que se usa como una dependencia para la convivencia privada (Feduchi, 1978).

En la localidad de Carmona, en la provincia de Sevilla, se reconoce la casa de patio central como la que identifica con más fidelidad la arquitectura tradicional de este pueblo. Este patrón distribuye una serie de crujías alargadas en torno a un patio central, que se configura como el elemento fundamental de estructuración de todo el edificio, registrando las estancias que lo rodean. Estas crujías perimetrales son a veces dobles, en uno o alguno de los

lados. El patio puede presentar uno o más frentes porticados, tanto en planta baja como alta, y dispone siempre de pozo. La presencia de este gran patio central no es incompatible con la existencia de corrales traseros, espacios de funcionalidad totalmente diferentes (Anglada, 2007).

Por otra parte, se pueden también reconocer algunas técnicas que permiten un mayor grado en el confort térmico en las viviendas de Andalucía y que proviene directamente del conocimiento popular. Una de estas técnicas es el control solar con el uso de persianas, contraventanas, cortinas, pero, sobre todo, de la precaución diaria de utilizar estos elementos en las horas de mayor radiación, que suelen ser las posteriores a la apertura de las ventanas para ventilar en la noche. Cuando dispositivos como las contraventanas no son utilizados, se producen aumentos en la temperatura interior de una media de 2.4 °C. Se encontró que las contraventanas son eficientes al reducir la demanda de refrigeración hasta en un 50% (Wael A. Yousef Mousa, 2017).

En cuanto a lo referido a los materiales con los que eran construidos estas viviendas, se tiene constancia del uso del tapial, que es una técnica constructiva que utiliza materiales naturales como tierra, cal, yeso, conglomerado, piedra o escombros cerámicos (J. Canivell, 2014). Este material es legado directo del período de ocupación islámica en la península Ibérica puesto que la mayor parte de los restos existentes pertenecen al período almohade, fechándose éstos entre la segunda mitad del siglo XII y la primera del siglo XIII. [...] tapias simples de época almohade localizados en el Alcázar de Sevilla correspondientes a ambas mitades del siglo XII. Existen distintos tipos en la estructura de las fábricas de tapial y durante el siglo XIII, en los recintos amurallados de Écija, se utilizaba la llamada solución latericia. Desde el punto de vista material, se evidencia una mejora de los tapias de época norteafricana. Como desde la fase precedente venía siendo habitual en el área sevillana, no se trata de tapias de tierra (tapia) sino de tapias mejoradas. La tendencia prenorteafricana más común, la de mejorar la argamasa con cal, es la que ahora se impone; será esto también lo que suceda en periodos posteriores y, en general, en todas las áreas geográficas que emplean esta técnica constructiva. Más adelante, en la época moderna (SS. XVI -XVIII) las ventajas de la técnica permitían una rapidez en la ejecución y una economía de medios, siendo especialmente dignas de considerar en unos momentos de expansión urbana y máxima actividad constructiva motivada por el establecimiento de la Casa de Contratación de Indias en 1503, por el consiguiente enriquecimiento de la población y por su amplio desarrollo demográfico. A partir del siglo XIX, la fábrica de ladrillo pasa a ocupar un papel determinante en la Historia de la Construcción local; en paralelo, en el ámbito urbano se evidencia el inicio de un proceso de decadencia de la técnica del tapial (Graciani, 2008). Acerca del enlucido de estos muros de tapial, en la localidad de Carmona, el baño de cal y el mortero de cal son las opciones más extendidas representando cada una de ellas un 38% del total de viviendas estudiadas (J. Canivell, 2014).

2 DESCRIPCIÓN DEL ENTORNO DE TRABAJO Y EXPERIMENTACIÓN

*"En teoría, no hay diferencia entre práctica y teoría.
En la práctica, si la hay."*

La sensación térmica, siempre positiva, que se experimenta durante el verano en la que es la casa de la abuela materna de la autora, motiva la realización de este trabajo. Se deciden realizar distintos experimentos con el objetivo de demostrar empíricamente que durante el verano en esta vivienda se puede disfrutar de unas condiciones de confort térmicas adecuadas sin necesidad de ningún equipo de refrigeración. En este capítulo se detalla por una parte la geometría de la casa y las características constructivas que se reconocen como propias de la arquitectura andaluza, así como el entorno en el que la casa se sitúa y, por otra parte, se describen los experimentos que se han llevado a cabo en dicha construcción.

2.1. Descripción del entorno de trabajo

En primer lugar, se presenta la localización y descripción de la vivienda y más tarde se procede con la descripción de los experimentos llevados a cabo durante el verano de 2023.

2.1.1 Entorno en el que se sitúa la casa

La vivienda se encuentra en la calle Ancha número 15, en el centro de la ciudad de Écija, provincia de Sevilla. Écija se sitúa en el sur de la Península Ibérica, a 87 km de la capital andaluza y a 63 km de la ciudad de Córdoba y a una altitud de unos 106 msnm. En la Ilustración 3 se muestra la ubicación de la ciudad con respecto al resto de España y la provincia de Sevilla.



Ilustración 3: Posición de Écija en España y en Sevilla. Autores de las imágenes HansenBCN y Miguillen

En cuanto a la climatología, según los Avances Climatológicos Mensuales de la AEMET, en los meses de julio y agosto de 2023 (AEMET, julio 2023) (AEMET, agosto 2023) la zona en la que se localiza Écija es una de las zonas de Andalucía en la que se observan temperaturas medias más altas. A continuación, se puede identificar en la Ilustración 4 la totalidad del municipio de Écija, como una de las zonas que tienen un color más rojo, indicando que se alcanzan temperaturas medias de hasta 28 °C en julio.

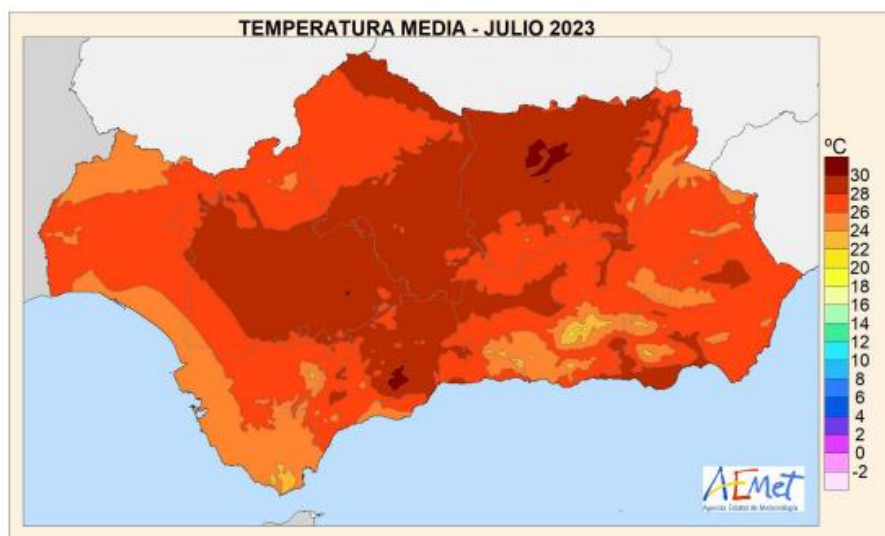


Ilustración 4: Mapa meteorológico de la temperatura media en julio en Andalucía. Fuente: AEMET

En la Ilustración 5, se puede observar como parte del municipio de Écija alcanza hasta los 30 °C de temperatura media durante el mes de agosto, en color rojo oscuro. Ambas ilustraciones, están tomadas de los Avances Climatológicos nombrados en el párrafo anterior.

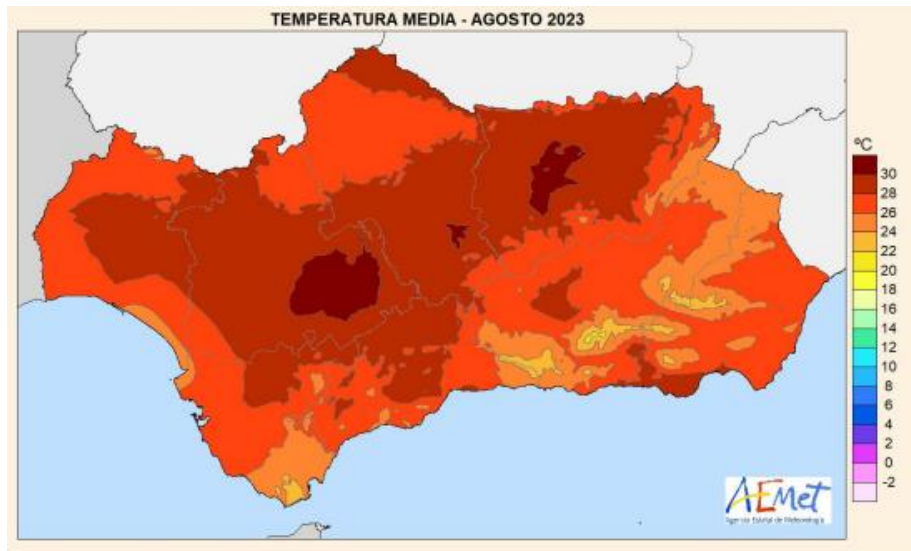


Ilustración 5: Mapa meteorológico de la temperatura media en julio en Andalucía. Fuente: AEMET

Alrededor de la casa, existen construcciones parecidas a esta puesto que la casa se encuentra en el centro histórico y no existen construcciones muy recientes como pudiesen ser altos edificios de bloques de vivienda. Por lo tanto, las viviendas colindantes cuentan con una altura parecida a la vivienda en estudio, como se puede observar en la Ilustración 6 y la Ilustración 7.



Ilustración 6: Vista I de la calle Ancha, Écija. Fuente: Google Earth



Ilustración 7: Vista II de la calle Ancha, Écija. Fuente: Google Earth

2.1.2 Descripción de la casa

La fecha de datación de la vivienda es desconocida puesto que los datos de catastro la sitúan en 1900, pero por experiencias de los habitantes, la casa es aún más antigua de esa fecha. Sufrió una gran reforma en 1999, donde por necesidad, se arregló el tejado, sustituyendo las tejas dañadas por tejas antiguas, ya que, al tratarse de una casa protegida, los arreglos no se pueden hacer con materiales nuevos.



Ilustración 8: Patio central

Las estancias se organizan en dos plantas alrededor de un patio, la característica constructiva que más se destacará durante el desarrollo de este trabajo. Se trata de un patio de piedra de planta cuadrada con 22 m² que está rodeado por unos soportales que, junto con el patio, hacen un total de 65,52 m². La Ilustración 8 es una fotografía de dicho patio tomada desde la galería de la segunda planta. Alrededor de esta construcción, se sitúan las habitaciones de la planta baja.

En el *ANEXO A. PLANOS DE LA VIVIENDA*, se puede conocer mejor la estructura de toda la casa. Los patios en España se diferencian de otros patios alrededor del mundo por ser pequeños ya que las necesidades de calefacción o enfriamiento natural son menores, gracias a estar localizados en climas templados como es el mediterráneo. Además, suelen tener aberturas en las fachadas, como son ventanas y balcones, para favorecer la iluminación y ventilación natural, siendo esta última no solo una estrategia de enfriamiento, si no que puede eliminar o reducir drásticamente el uso del aire acondicionado en climas templados (Mohammad Taleghani, 2012). Esta vivienda tiene todas esas características ya que existe un patio, tiene aberturas en la fachada para favorecer la ventilación e iluminación natural y no se utiliza el aire acondicionado. Además, cuenta con un patio trasero al que se accede desde un pasillo que estaba pensado para el acceso del ganado, pues este patio trasero en realidad estaba diseñado a modo de cuadras.

La vivienda cuenta además con una segunda planta en la que se localizan otras habitaciones y estancias que también pueden consultarse en el *ANEXO A. PLANOS DE LA VIVIENDA*.

Otra de las características que se destacará en el estudio, es la presencia de elementos masivos como son los muros tanto exteriores como interiores que de media tienen un ancho de en torno a 60 cm. La galería que se sitúa justo encima de los soportales y que se menciona en el párrafo anterior, parece haber sido incluida en alguna reforma que se realizó en la casa en su antigüedad, puesto que los muros que están en contacto con el exterior están caracterizados por ser bastante más delgados que los que separan el resto de las estancias. En las siguientes imágenes se puede observar una comparación entre las medidas de los muros con más grosor, que alcanzan más de 60 cm de ancho, mientras que los muros de las galerías miden tan solo más de 29 cm. Las características constructivas y térmicas se detallarán en el *ANEXO D. ENTORNO DE SIMULACIÓN*.

Por último, se indica otra de las características que se perciben en esta casa como una de las grandes reductoras de la demanda de refrigeración y es un gran control solar. Existe una ratio zona acristalada-muro baja y además todas las ventanas cuentan con una contraventana que permite alcanzar la máxima oscuridad cuando están cerradas. Durante el período de verano es bastante frecuente que estas contraventanas estén cerradas, ya que las estancias que se usan durante el día (sala de estar, cocina, etc.) se encuentran iluminadas gracias a la luz natural que entra por el patio central o el trasero, sin necesidad de recurrir a las ventanas que están en la fachada. En la Ilustración 9 se puede ver cómo son los elementos que componen la ventana.



Ilustración 9: Hoja de la ventana y su contraventana cerrada

Sin embargo, el resto de los elementos de la ventana parecen contraproducentes en la reducción de la demanda energética, puesto que se trata de marcos de madera y acristalamientos simples. Para un mayor control solar, las ventanas ubicadas en el salón y la habitación de la planta alta cuentan además con una persiana de madera en el exterior, mientras que la puerta del balcón de ese mismo salón cuenta con una persiana de aluminio de estilo acordeón, como se puede observar en la Ilustración 10.



Ilustración 10: Detalle protección solar balcón y ventanas fachada planta superior.

Otro elemento de control solar a destacar y que se muestra en la Ilustración 11, es el toldo corredero que está presente en el patio y que se despliega normalmente durante el verano desde las diez de la mañana hasta las nueve de la noche aproximadamente, teniendo en cuenta la trayectoria del sol, para evitar que, en ningún momento, el sol incida directamente sobre las instalaciones de la casa.



Ilustración 11: Vista del toldo desplegado desde la planta alta

Para la finalidad de este trabajo, que es el estudio de características comunes a construcciones antiguas en la zona de Andalucía, los estudios que se van a desarrollar, acotan una zona de la casa, en la que se reúnen características que se han reconocido comunes en otras construcciones de la misma tipología. Uno de los elementos que se ha descartado es el patio trasero por tratarse de un elemento demasiado específico de esta casa y no existir de manera generalizada en otras construcciones en Andalucía. En la Ilustración 12 y la Ilustración 13, se pueden observar las zonas de análisis en color azul de la planta baja y alta respectivamente.

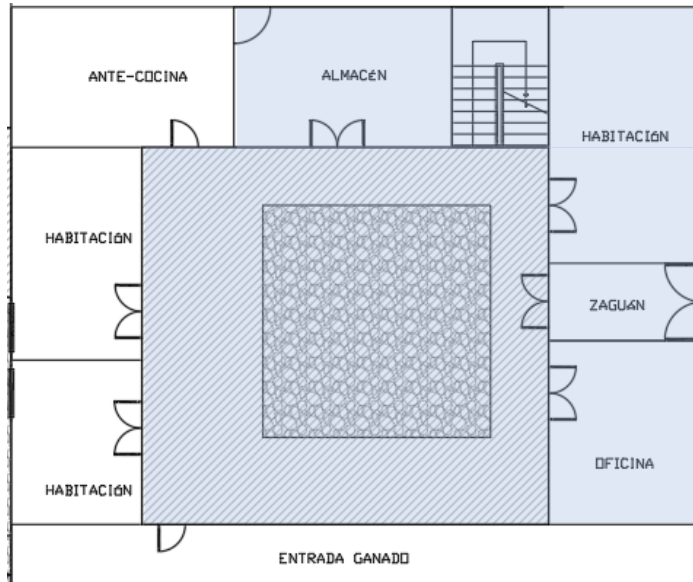


Ilustración 12: Zonas de análisis de la planta baja

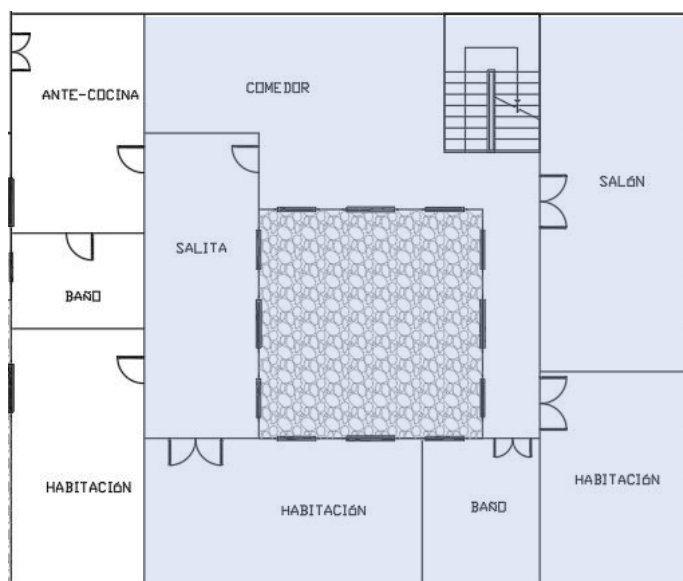


Ilustración 13: Zonas de análisis de la planta alta

Además de las plantas baja y alta, también se cuenta con una última planta en la que se localiza una pequeña azotea. Desde esta azotea, en la que se toma la fotografía de la Ilustración 14, se puede observar magníficamente la cubierta de la vivienda, que se trata de cuatro segmentos, uno de ellos dispuesto a dos aguas y los otros tres a un agua, de tejas.



Ilustración 14: Vista de la cubierta desde la azotea de la tercera planta

2.2. Descripción de los experimentos

La finalidad de los experimentos que se han llevado a cabo es la justificación empírica de la experiencia previa de que, durante el verano en esta vivienda, se puede disfrutar de unas condiciones de confort térmicas adecuadas que no responden al uso de ningún equipo de refrigeración. Sobre todo, teniendo en cuenta las condiciones exteriores desfavorables para que este hecho se dé, como se ha comentado en el punto 2.1.1. Para ello, se han analizado distintas condiciones operativas de la vivienda, como por ejemplo la ventilación nocturna, cuyas bases teóricas se explicarán en futuros capítulos. Por la zona de análisis, cuya elección se ha detallado en el punto 2.1.2, todos los espacios que se han estudiado están en torno al patio central y mayormente, en contacto también con la fachada de la vivienda, por lo tanto, en contacto con el ambiente exterior.

Los experimentos comienzan el 2 de julio del 2023 a las 17:20 h y terminan el 1 de octubre a las 17:20 h. Se han llevado a cabo tanto en el interior de las zonas de análisis, como en el exterior.

2.1.1 Instrumentos de medida

Por una parte, se ha medido temperatura del aire de las habitaciones seleccionadas y por otra parte condiciones climatológicas exteriores, en concreto, temperatura exterior y velocidad y dirección del viento. En primer lugar, para la medición de la temperatura, se han colocado los sensores OM-EL-USB-2-LCD de la marca Omega Engineering, en adelante, Omega. En la Ilustración 15 se puede ver uno de estos sensores.



Ilustración 15: Sensor Omega OM-EL-USB-2-LCD

En segundo lugar, para la medición de las condiciones exteriores se ha utilizado la estación meteorológica PCE-FWS 20N de la marca PCE Instruments, en adelante, Estación Meteorológica. Se muestra en la Ilustración 16.



Ilustración 16: Estación Meteorológica PCE-FWS 20N

Cabe destacar que, durante la ejecución de los experimentos, se fueron variando la posición de algunos sensores

porque los lugares en los que se acomodaron en un inicio, tras ver los resultados, se consideraron inadecuados para la toma de medidas. También, hubo que reemplazar algunos equipos que no estaban funcionando como se esperaba (la recogida de datos no se había producido en los intervalos programados o las mediciones no eran lógicas). En el caso de los sensores de temperatura, la sustitución se hizo por los equipos RC-5 USB Temperature Data Logger de la marca Elitech (en adelante, Elitech), como el que se muestra en la Ilustración 17.



Ilustración 17: Sensor Elitech RC-5 USB

En el caso del anemómetro de la estación meteorológica, se sustituye por PCE-ADL 11 Anemometer de la marca PCE Instruments (en adelante, Anemómetro), que se muestra en la Ilustración 18. En los casos en los que se produjeron estos incidentes, se indicará la forma en la que se procedió. A continuación, se describe la ubicación de los instrumentos dentro de la casa con un punto en rojo sobre la zona exacta donde se colocan dentro de la habitación, así como una foto de la localización.



Ilustración 18: Anemómetro PCE-ADL 11

El intervalo con el que se recogen todas las medidas, ya sean de temperatura o velocidad del viento, es cada diez minutos.

2.1.2 Campaña de monitorización

En este apartado se describirá la colocación de los instrumentos que se han indicado en el apartado anterior, en las diferentes zonas de estudio de la casa. Con un punto rojo, se muestra la localización relativa del sensor en la habitación.

- Primera planta. Zaguán (Sensor 1)

En un primer momento, hasta el 26 de julio, el sensor se encontró en el suelo, debido a la poca presencia de muebles en este local. Sin embargo, al estar en contacto con el suelo y la pared, no estaba proporcionando una medición adecuada de la temperatura del aire de esta zona, que es el objetivo de los experimentos. A partir de dicho 26 de julio, el sensor se ha colocado gracias a la ayuda de un alambre y una cinta adhesiva, colgado de la varilla que atranca la puerta de entrada al domicilio, como se puede observar en la Ilustración 19.

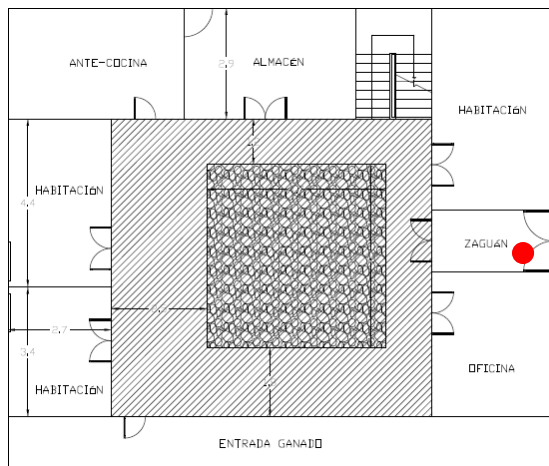


Ilustración 19: Posición del sensor 1

- Primera planta. Oficina exterior (Sensor 2)

En este caso, el sensor que se coloca al principio no permite la lectura correcta de los datos, por lo que debe ser reemplazado. En su lugar, el día 26 de julio, se reemplaza por el sensor que estaba midiendo la temperatura interior de la habitación (se comenta a continuación), puesto que ya se contaba con la instalación de un soporte para la tipología de sensor Omega. El sensor se coloca en el centro de la ventana, atado con bridas a la reja de la ventana, protegido por la celosía. En este caso concreto, el sensor no se coloca para medir temperatura interior, si no por el contrario, para medir la temperatura exterior a pie de calle que puede diferir con la temperatura recogida por la estación meteorológica, situada en la azotea. El sensor se sitúa en un soporte, que está en el interior de un vaso de plástico, como se muestra en la Ilustración 20.

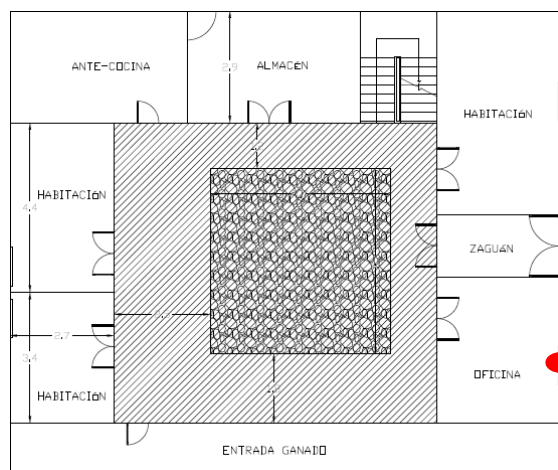


Ilustración 20: Posición del sensor 2

- Primera planta. Oficina interior (Sensor 3)

De esta estancia siempre se han podido recabar datos, desde el 2 de julio con el sensor Omega y a partir del 26 de julio, con el Elitech, a causa del remplazo del primer sensor que se había colocado en la oficina, pero en el exterior. Sin importar cuál haya sido el instrumento, siempre se ha localizado encima de un escritorio, como se muestra a continuación en la Ilustración 21.

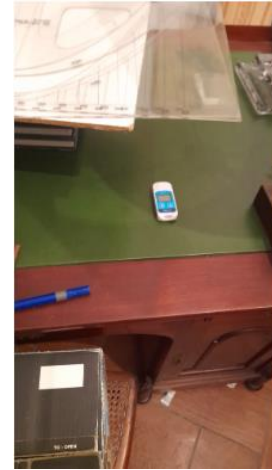
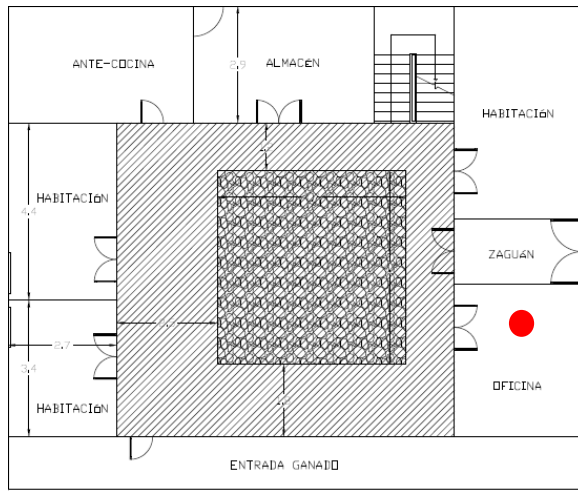


Ilustración 21: Posición del sensor 3

- Primera planta. Entrada patio (Sensor 4)

En primera instancia, el sensor se colocó cerca de la pared y más tarde se pensó que en ese lugar, las medidas no serían demasiado representativas como ocurría en el caso del zaguán. Finalmente, a partir del día 26 de julio el sensor se coloca en una mesa que se encuentra bajo los soportales alrededor del patio por lo que queda protegido de la intemperie, aunque esté en contacto con el aire exterior que queda confinado por el patio. Se muestra con una elipse en rojo, el lugar donde está el sensor sobre la Ilustración 22.

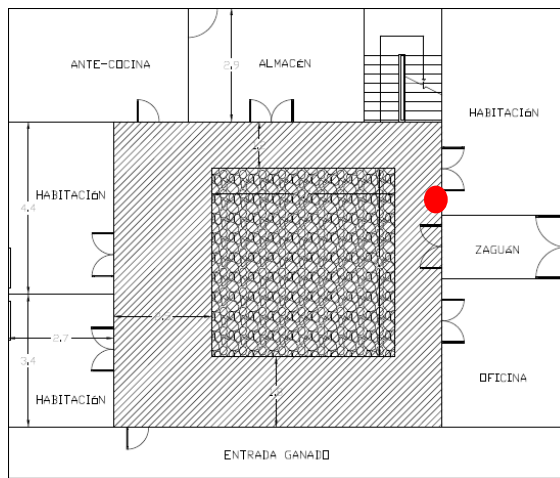


Ilustración 22: Posición del sensor 4

- Primera planta. Habitación (Sensor 5)

En este caso, también hubo problemas con el primer sensor que se colocó marca Omega, por lo tanto, a partir del día 26 de julio, se reemplaza por uno marca Elitech. Se muestra en la Ilustración 23 como el sensor está encima de un tocador.

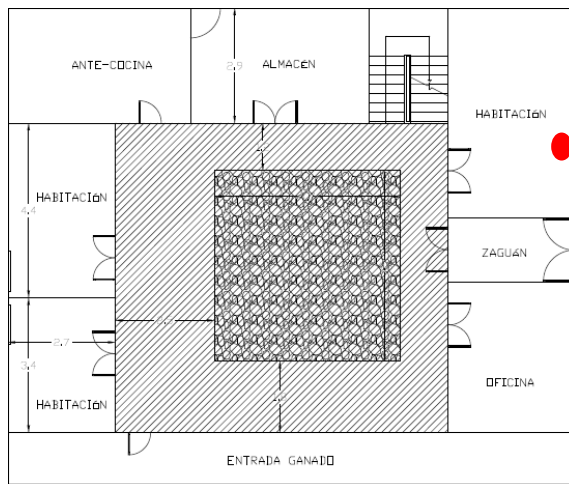


Ilustración 23: Posición del sensor 5

- Segunda planta. Ventana (Sensor 6)

Se ubica en una de las ventanas que da al patio, justo en el alféizar. Para colocarla, se dispone un vaso de plástico recubierto con papel aluminio para evitar la radiación directa sobre el sensor y en el interior de este, se coloca un soporte para el sensor. Todo ello se puede consultar en la Ilustración 24.

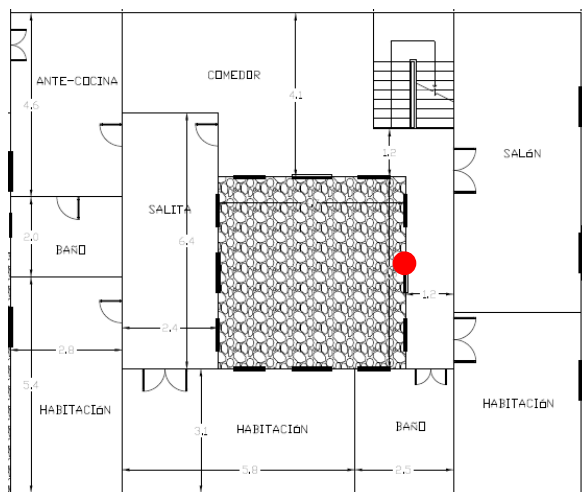


Ilustración 24: Posición sensor 6

- Segunda planta. Comedor (Sensor 7)

Se coloca encima de un mueble aparador, como se observa en la Ilustración 25.

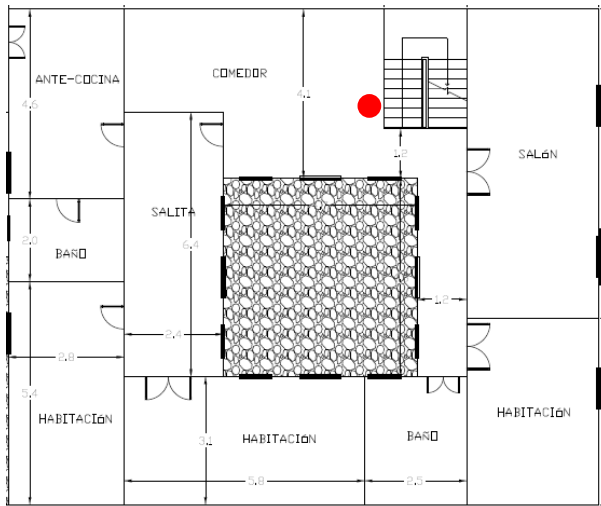


Ilustración 25: Posición sensor 7

- Segunda planta. Habitación (Sensor 8)

En la Ilustración 26 se observa que se coloca encima de un tocador.

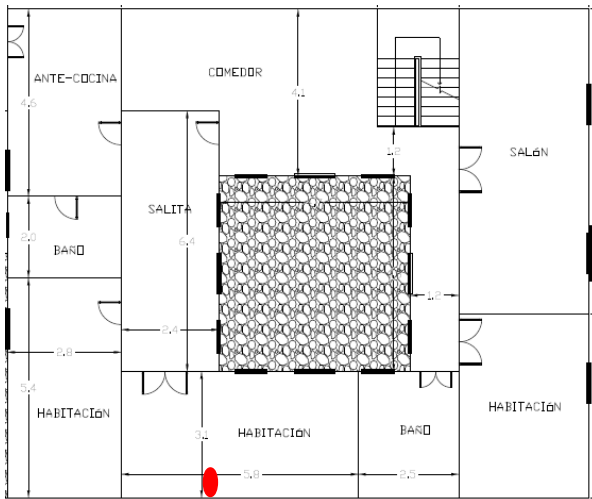


Ilustración 26: Posición del sensor 8

- Segunda planta. Salón (Sensor 9)

Se coloca encima de una mesa baja, lejos de la corriente que es propiciada durante la apertura de la ventana y la puerta de esta estancia y las ventanas y puertas contiguas que se encuentran en la galería, para el experimento de la ventilación nocturna que se explicará más tarde. A continuación, se muestra la localización exacta del sensor, con una circunferencia roja en la Ilustración 27.

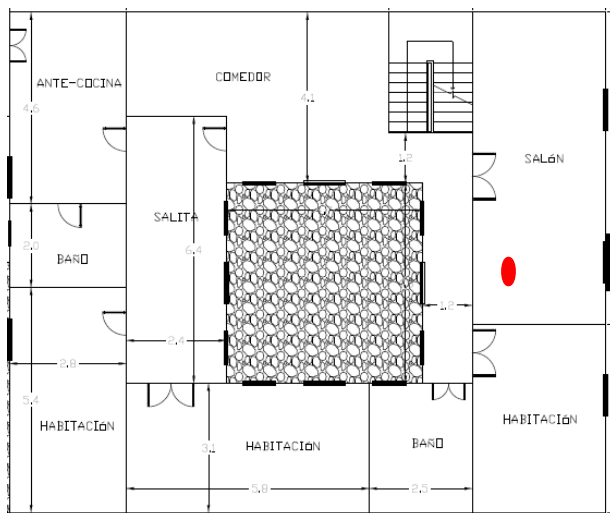


Ilustración 27: Posición del sensor 9

- Segunda planta. Habitación Fachada (Sensor 10)

Se coloca encima de una mesilla, lejos de la corriente que es propiciada durante la apertura de la ventana y la puerta de esta estancia y las ventanas y puertas contiguas que se encuentran en la galería, para el experimento de la ventilación nocturna que se explicará más tarde. A continuación, se muestra la localización exacta del sensor en la Ilustración 28.

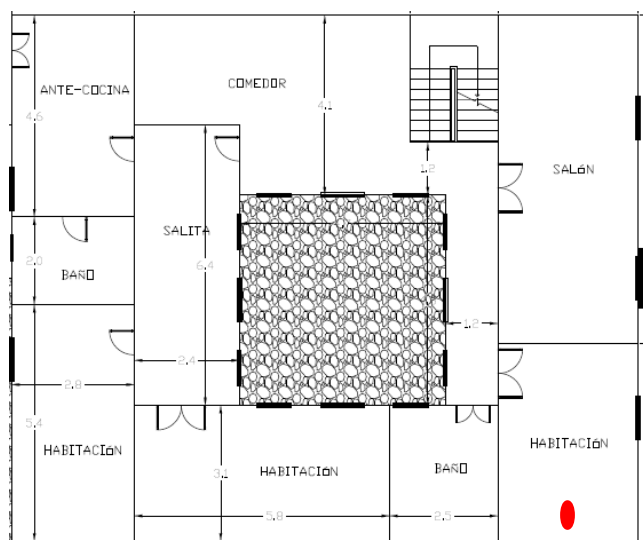


Ilustración 28: Posición del sensor 10

- Azotea. Estación meteorológica

El último de los instrumentos que se ha colocado es la Estación Meteorológica y el Anemómetro, como pueden verse en la Ilustración 29, este último, para sustituir la función del anemómetro de la Estación Meteorológica que no estaba presentando datos de velocidad de viento. El Anemómetro se colocó el día 6 de agosto. Para obtener los datos de velocidad de viento, se realiza un procedimiento de línea base gracias a los datos que se describen en el apartado 2.1.4 Datos climáticos coincidentes. De igual forma, se procederá con los datos que la Estación Meteorológica no ha ofrecido desde el día 16 de julio a las 10:41 h hasta el día 30 de julio a las 21:41 h y cuya causa se debe a algún fallo de la conectividad entre la estación situada en el exterior y el dispositivo que recoge la información, este último situado en el interior de la casa.

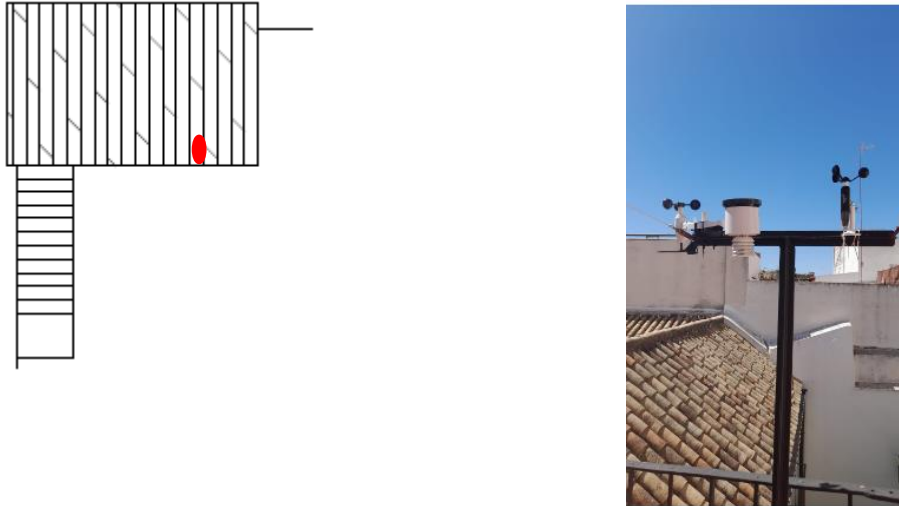


Ilustración 29: Posición Estación Meteorológica

2.1.3 Experimentos para evaluar la ventilación nocturna

La campaña de monitorización anteriormente descrita se combina con un experimento en el que se evalúan los efectos de la ventilación nocturna. Este experimento consiste en la apertura de ventanas y puertas en la zona oeste de la vivienda, justo la fachada que da a la calle Ancha, en la planta alta. Normalmente, durante el verano, esta zona se encuentra deshabitada y tanto ventanas como puertas, se encuentran normalmente cerradas. Por eso, al abrir las ventanas y puertas de manera controlada durante algunas noches, se pueden comprobar los efectos que tiene la ventilación nocturna en construcciones como esta en la que existe un patio. A continuación, se muestra en la Ilustración 30 con una línea roja, qué ventanas y puertas se abren durante este experimento.

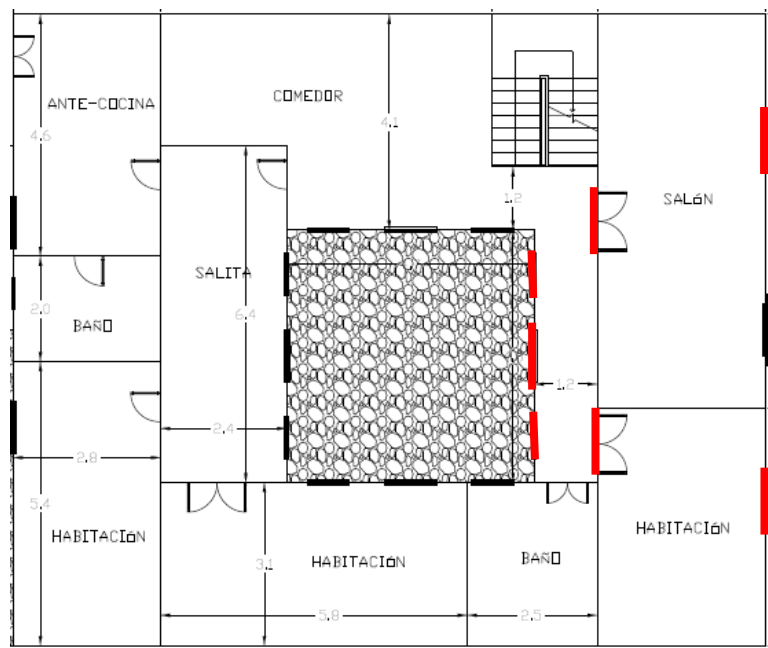


Ilustración 30: Puertas y ventanas abiertas zona oeste segunda planta

Los experimentos se llevan a cabo entre las 21:00 h y las 10:00 h de la mañana siguiente entre los períodos que se indican a continuación:

- 9 - 10 julio de 2023
- 15 - 16 julio de 2023

- 22 - 25 julio de 2023
- 29 julio – 1 agosto de 2023
- 12 al 14 de agosto de 2023
- 15 al 17 de agosto de 2023
- 20 al 24 de agosto de 2023
- 26 al 28 de agosto de 2023

Este experimento viene motivado porque la ventilación nocturna se concibe como una técnica de reducción de la demanda de energía, cuya expresión matemática se muestra en la Ecuación 1.

$$\frac{Q}{A_a} = (\rho * Cp * ACH_{noche} * altura) * GH_{noche} * \varepsilon * \eta$$

Ecuación 1: Reducción de la demanda por ventilación nocturna

Siendo:

- Q energía calorífica en Wh
- A_a superficie en m^2
- ρ densidad del material en kg/m^3
- Cp calor específico del material en $J/(kg K)$
- ACH_{noche} renovaciones de aire a la hora durante la noche en h^{-1}
- $altura$ altura de la habitación en estudio en m^3
- GH_{noche} grados- hora en $^{\circ}C h$, que describe el incremento de temperatura entre la temperatura exterior e interior durante el total de horas de un período determinado
- ε eficiencia de intercambio, que depende de cómo sea el flujo del aire que circule y su relación con la superficie de intercambio
- η factor de utilización, que depende de la inercia térmica

En principio, existen diferentes características en esta vivienda que pueden relacionarse con cada uno de los términos de la ecuación. En cuanto al factor de utilización, se sabe que los elementos masivos de la vivienda como son los muros actúan como acumuladores de la energía durante la noche y liberan esta energía durante el día. En lo relativo a la eficiencia de intercambio, se debe considerar que, al circular el aire por la habitación durante la noche, por lo tanto, con una temperatura más baja respecto a la de las paredes, y gracias al mecanismo de transmisión de calor por convección, las paredes se enfrían. Según sea el recorrido de este aire, así será la eficiencia. Por otra parte, el ACH_{noche} está condicionado al caudal de aire que pase por los huecos de la vivienda y la velocidad del viento. Una noche en la que no corra el viento, es decir, que la velocidad de este sea muy baja, la reducción de la demanda se verá afectada sobremanera, al igual que si la vivienda cuenta con huecos demasiado estrechos en comparación con los metros de fachada con los que cuentan. Por último, se hace especial énfasis en el valor de los GH_{noche} . La obtención de unas temperaturas más bajas en el interior de la vivienda está promovida por el hecho de que el aire proveniente del exterior debe ser más frío que la temperatura del aire que la habitación ha acumulado durante el día y, por lo tanto, la diferencia entre la temperatura exterior y la interior será negativa. De ahí que el término completo sea considerado como una reducción de la demanda. Puesto que en los experimentos descritos anteriormente se medirá temperatura, cada vez que se observe una reducción en la temperatura de los espacios motivada por la ventilación nocturna, esto supondrá inequívocamente una reducción en la demanda de energía. De aquí en adelante, cada vez que se haga mención a la reducción de las temperaturas motivada por la ventilación nocturna, se supone una reducción en la demanda de refrigeración y, por tanto, de energía.

El interés del estudio de la ventilación nocturna en este tipo de construcciones radica en la presencia del patio. Este elemento arquitectónico hace que las corrientes de aire estén a merced de la diferencia de presiones que se origina entre calle y patio, por lo que conduce el flujo de aire de manera característica al resto de construcciones que no cuentan con la presencia de un patio interior.

Para caracterizar el flujo de aire, además de estudios aerodinámicos que se han llevado a cabo y que se adjuntan en el *ANEXO C. MODELO FLUIDODINÁMICO DE LA VENTILACIÓN* se ha llevado a cabo un experimento que consiste en la instalación de unos alambres en las puertas de las habitaciones en las que se realiza el anterior experimento de ventilación nocturna. En estos alambres, se han colocado una serie de hilos de costura, que permiten observar el sentido de la corriente de aire una vez están abiertas las ventanas. En la Ilustración 31, se muestra el experimento que se llevó a cabo en la noche del 15 de agosto.



Ilustración 31: Instalación de alambre e hilos para experimento sentido de la corriente de aire

Esto permite conocer la dirección del flujo de aire que atraviesa la habitación. Los movimientos de aire se pueden diferenciar entre movimientos debido a las fuerzas de flotabilidad, es decir, caracterizados por la convección libre y generados por diferencia de temperaturas y movimientos debido a una velocidad de aire alta, es decir, viento del aire exterior, caracterizado por la convección forzada. El movimiento de los hilos a distintas alturas permiten distinguir entre uno y otro. Si todos los hilos se mueven en un mismo sentido, significa que predomina la convección forzada provocada por el viento. Si por el contrario, los hilos de menor altura se mueven en sentido contrario a los de mayor altura, el movimiento se debe a la diferencia de densidad en el aire, es decir, predomina la convección libre. Durante los experimentos se identificó un problema que dificultó la caracterización del flujo de aire. El movimiento de los hilos se veía condicionado por el efecto túnel que se producía en la calle Ancha con el paso de los vehículos.

2.1.4 Datos climáticos coincidentes

Para contrastar los datos que se han ido obteniendo durante la experimentación, se ha recurrido a la información de las Estaciones Meteorológicas del Sistema de Información Agroclimática para el Regadío del Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación del Gobierno de España. Concretamente, se ha recurrido a los datos de la Estación de Écija (en adelante SIAR), situada a 7,6 km de la vivienda y una altitud de 106 msnm, con coordenadas 37° 35' 34" N, 05° 04' 37" O.

Los datos recogidos por SIAR entre el período en el que se llevaron a cabo los experimentos en la vivienda, constatan que las temperaturas se mantuvieron entre los 45,1 °C el día 11 de agosto de 2023 y los 14 °C el día 28 de agosto de 2023, concibiéndose estos como el día más caluroso y la noche más fría durante el período experimental en la ciudad de Écija. También se hace uso de estos datos para el apartado siguiente.

3 ANÁLISIS CUALITATIVO

“Yet, the courtyard is more than just an architectural device for obtaining privacy and protection. It is, like the dome, part of a microcosm that parallels the order of the universe itself.”

Hassan Fathy (1986)

EN este capítulo se analizan los resultados de la campaña de monitorización que se ha descrito en el capítulo 2 de forma cualitativa, mostrando con gráficos el comportamiento térmico de las habitaciones en estudio. Con el objetivo de evitar repeticiones, en el presente capítulo se muestran los resultados de algunos de los espacios, mostrándose el total de los análisis en el ANEXO B. ANÁLISIS CUALITATIVO ZONAS EXTRA.

3.1 Resultados de la campaña de monitorización

A continuación, se procede a analizar la temperatura medida de cada una de las estancias o zonas de más relevancia entre las que se han instalado los sensores, comparando las temperaturas exteriores e interiores y poniendo más énfasis en los días en los que se ha producido ventilación nocturna.

3.1.1 Primera planta. Oficina exterior (Sensor 2)

En este caso, las medidas se recogen desde el 26 de julio a las 20:10 h hasta el 1 de octubre a las 17:10 h. Según la Figura 3, la temperatura exterior a nivel de la calle alcanza máximas y mínimas más altas que las que se registran en la Estación Meteorológica situada en la azotea. Esto viene motivado en cuanto a que condiciones como el paso de vehículos o la ausencia de zonas verdes, aumentan la temperatura del entorno.

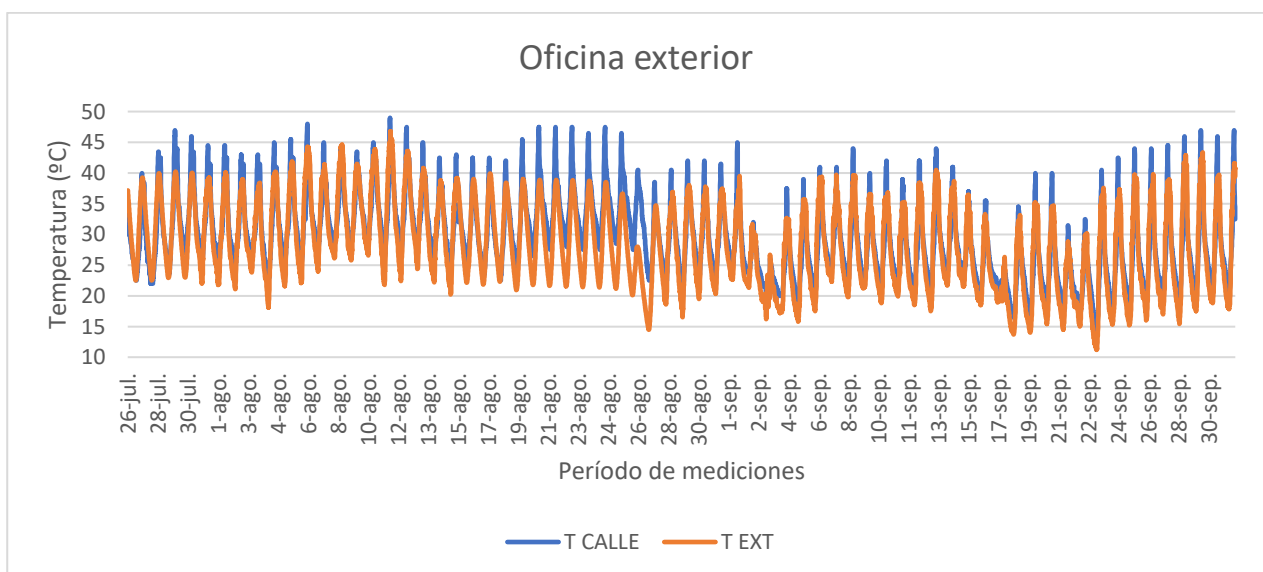


Figura 3: Temperatura a nivel de calle medida en la oficina y temperatura exterior

3.1.2 Primera planta. Oficina interior (Sensor 3)

En este caso, las medidas se recogen desde el 2 de julio a las 17:20 h hasta el 1 de octubre a las 17:10 h. Las máximas y mínimas interiores varían en un rango de un grado, siempre siguiendo la tendencia marcada por las excitaciones exteriores, como se puede ver en la Figura 4. Esto se puede apreciar durante el último mes en el que la temperatura exterior es mucho más baja y así es como reacciona la habitación. Es esta habitación en la que se observa una mayor cercanía entre máximas y mínimas interiores de todas las estudiadas. La discusión se hará en el apartado 3.2.

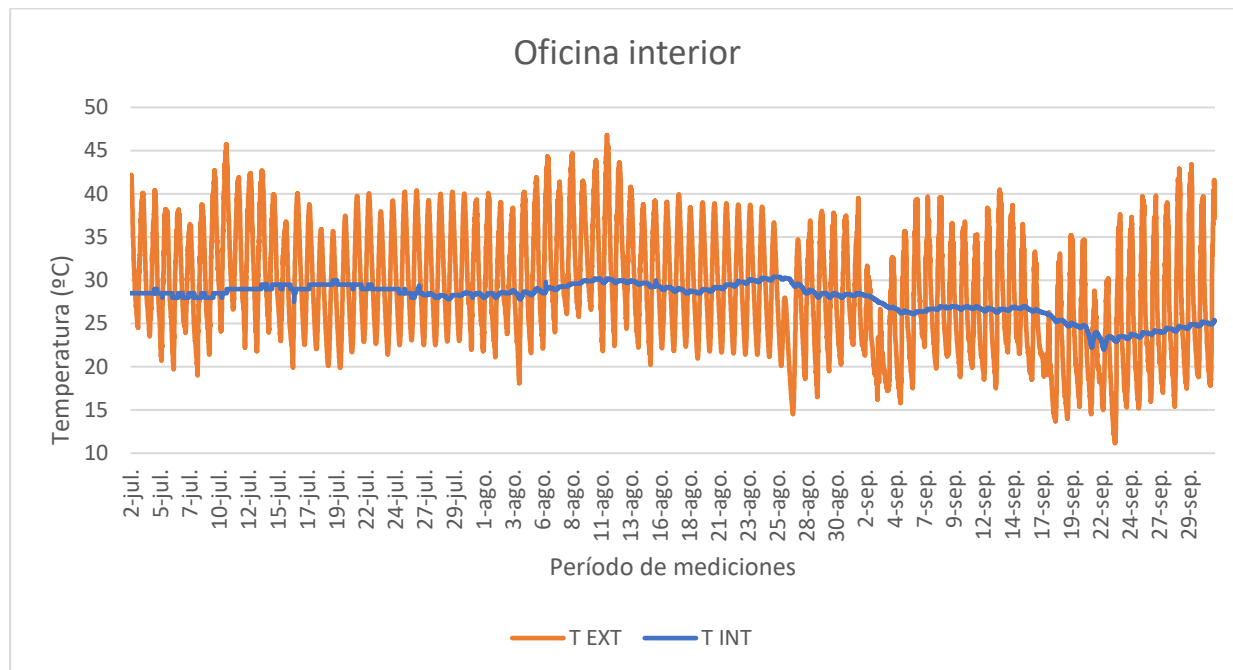


Figura 4: Temperatura interior medida en el interior de la oficina y temperatura exterior

3.1.3 Primera planta. Entrada patio (Sensor 4)

En este caso, las medidas se recogen desde el 2 de julio a las 17:20 h hasta el 1 de octubre a las 17:10 h. Como se puede observar en la Figura 5, el rango de temperaturas varía en torno a los 5 °C de media entre máximas y mínimas. Hay que tener en cuenta que este es un sensor que se encuentra en el exterior, aunque esté protegido por el soportal del patio. Es una gran diferencia si se compara con el sensor 2, oficina exterior, que está en el mismo plano, aunque localizado fuera de la vivienda. Se compararán más en detalle en el apartado 3.2.

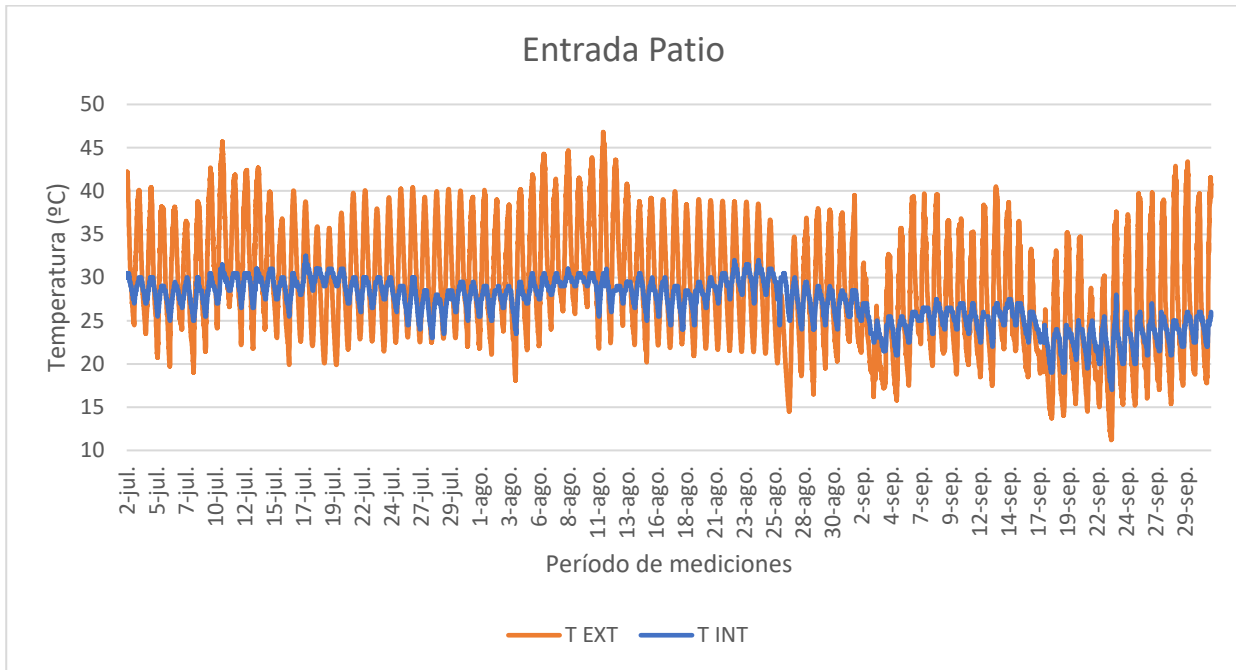


Figura 5: Temperatura interior medida en la entrada del patio y temperatura exterior

3.1.4 Segunda planta. Ventana (Sensor 6)

En este caso, las medidas se recogen desde el 2 de julio a las 17:20 h hasta el 1 de octubre a las 17:10 h. Se muestran las temperaturas registradas en la Figura 6. El rango entre máximas y mínimas se sitúa en torno a los 15 °C y la temperatura recogida por el sensor 6 sigue de manera mucho más acentuada que en los anteriores experimentos, las excitaciones exteriores. Sin embargo, cabe destacar que entre las temperaturas máximas exteriores e interiores hay una diferencia de unos 4 °C, hecho que se puede justificar gracias a la presencia del toldo durante las horas de mayor radiación. Se observa una diferencia entre las mínimas exteriores e interiores de alrededor de 4 °C. En el apartado 3.2 Discusión de los resultados se comparará las mediciones recogidas por este sensor con aquellas recogidas por el sensor 4.

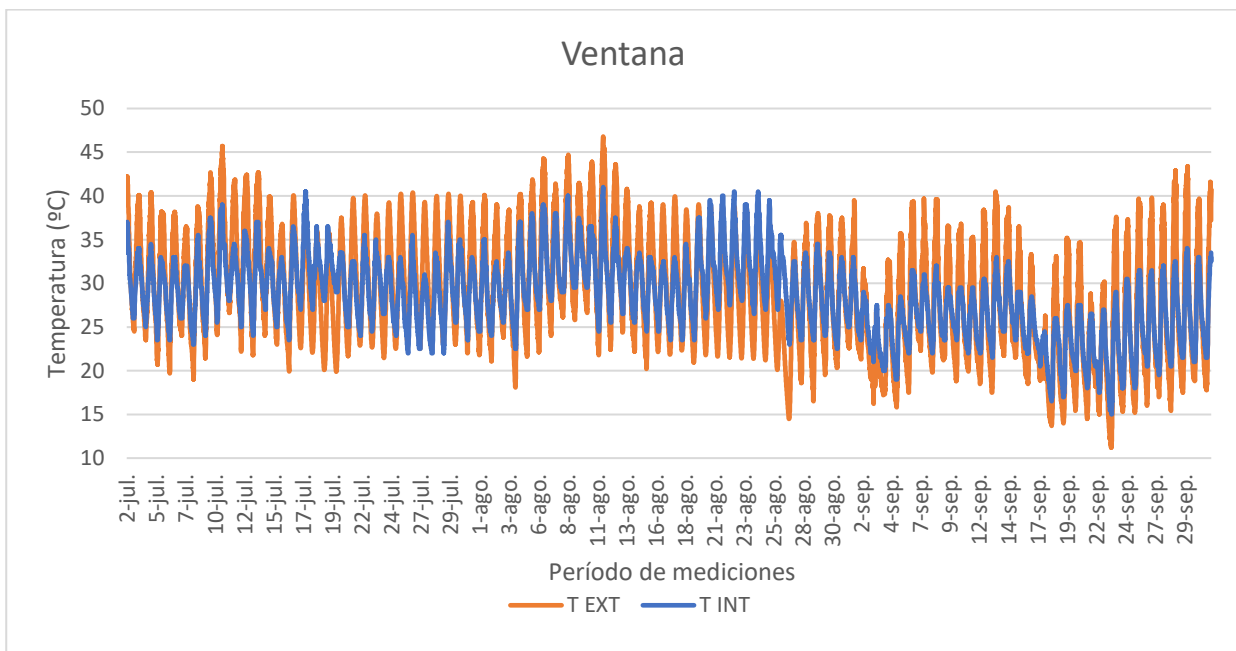


Figura 6: Temperatura interior medida en la ventana y temperatura exterior

3.1.5 Segunda planta. Salón (Sensor 9)

En este caso, las medidas se recogen desde el 2 de julio a las 17:20 h hasta el 1 de octubre a las 17:10 h. En esta estancia, se reprodujo durante los meses de julio y agosto el experimento de la ventilación nocturna que se ha detallado en el capítulo 2 Descripción del entorno de trabajo y experimentación. Los experimentos tenían una duración variable, con las que se pudieron observar distintos fenómenos cada vez y que coinciden con las mediciones indicadas en verde en la Figura 7.

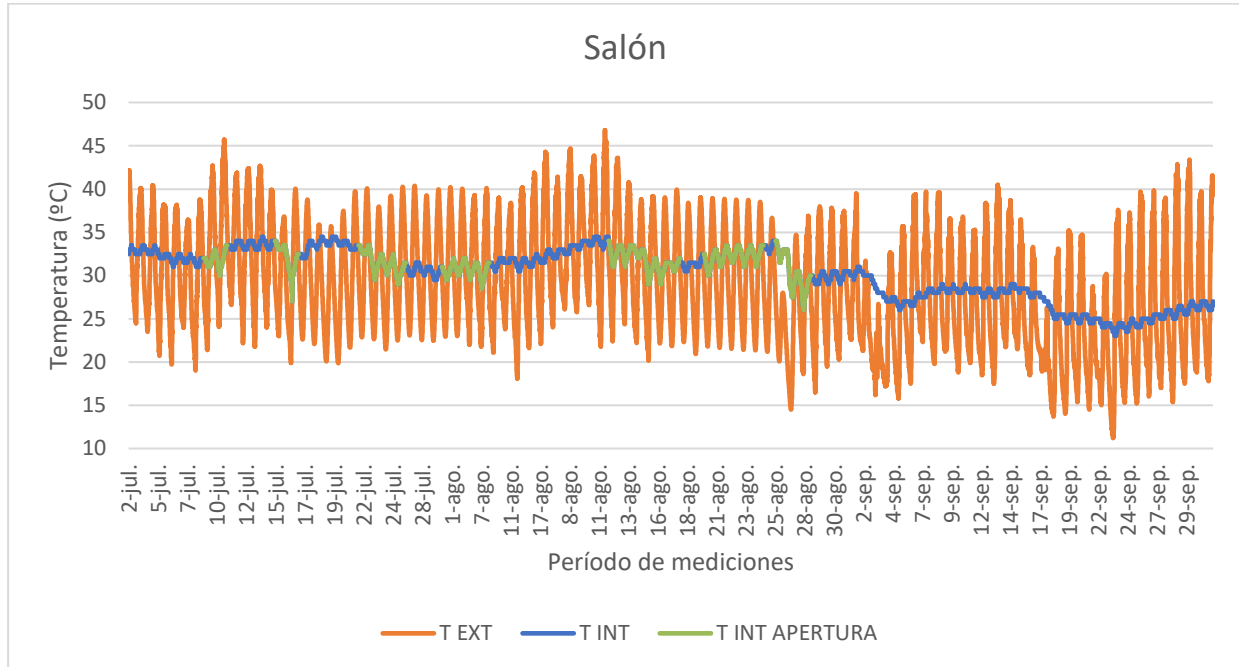


Figura 7: Temperatura interior medida en el salón y temperatura exterior

A continuación, se muestran detalladamente las gráficas de algunos los períodos en los que se ha producido ventilación nocturna, junto con unos días precedentes y posteriores para poder observar el cambio que se produce al abrir las ventanas. El resto de los períodos se pueden encontrar en el ANEXO B. ANÁLISIS CUALITATIVO ZONAS EXTRA, ya que los aspectos más destacables ya se habían comentado.

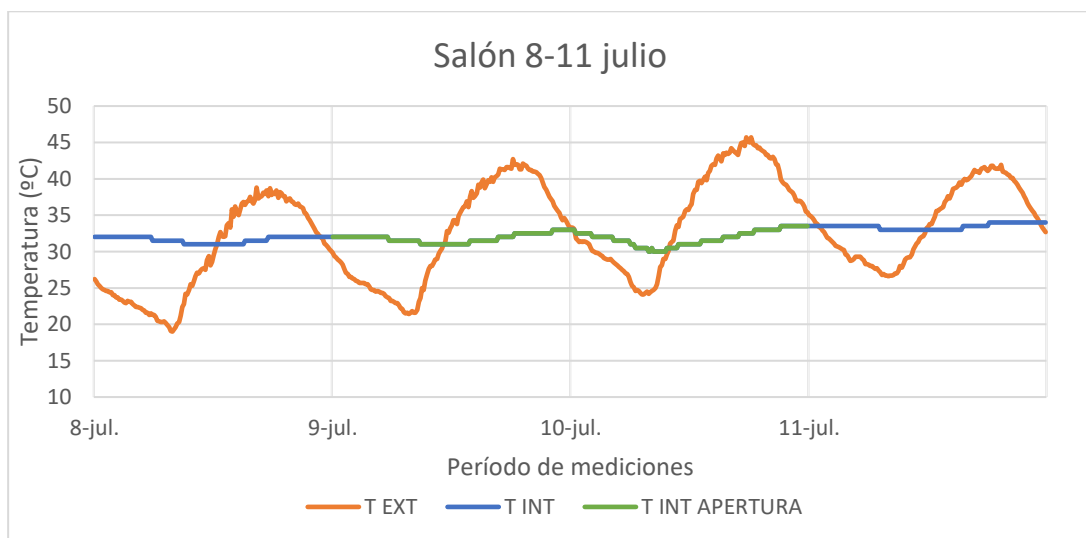


Figura 8: Período 8-11 de julio en salón

En este caso la ventana se abre tan solo una noche entre el 9 y el 10 de julio y respecto a los días

anteriores donde la curva es mucho más plana, se observa una caída de las temperaturas hasta alcanzar los 30 °C alrededor de la mañana del 10 de julio pese a que las temperaturas exteriores aumentaban. Mientras en casos anteriores se ha destacado el efecto de amortiguación de la inercia térmica, y por lo tanto, una curva plana, con la apertura de las ventanas se rompe esa estabilidad en las temperaturas haciendo que sus condiciones térmicas sean más próximas al exterior, ya que representa un beneficio.

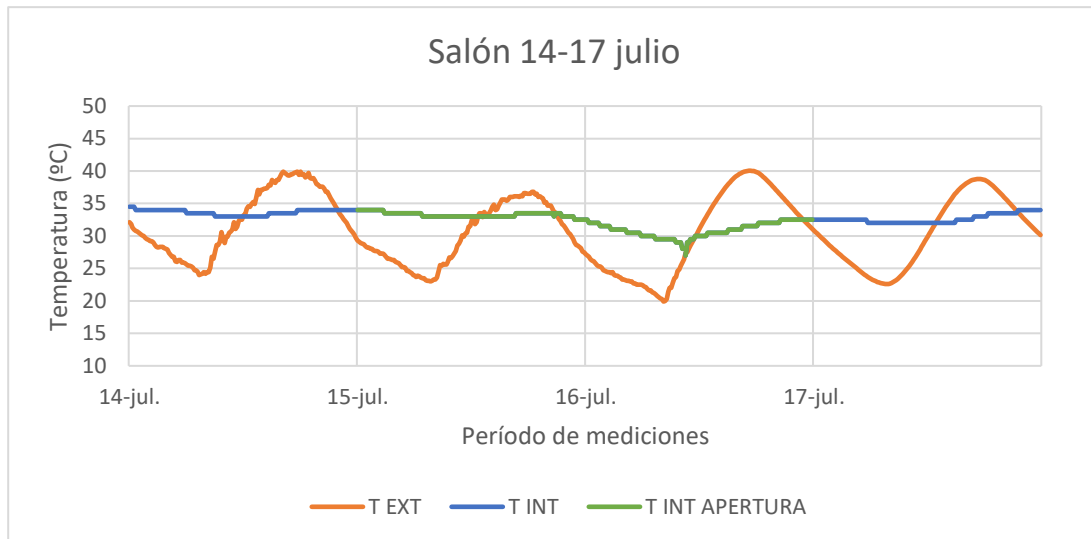


Figura 9: Período 14 -17 de julio en salón

Igual que en el caso anterior, solo se abre una noche y se puede observar claramente como la curva de esa noche (en verde) es mucho menos plana, alcanzado una mínima de entorno a los 27 °C alrededor de las 12 h. Es interesante observar el decaje entre las mínimas exteriores que se producen en torno a las 8 h, antes de la salida del sol, y las mínimas en la habitación. Esta es una prueba inequívoca de la inercia térmica actuando como almacenamiento de energía. Se puede percibir también un efecto a largo plazo de la apertura nocturna de las ventanas, puesto que, aunque las máximas exteriores de los días 14 y 16 sean parecidas, el día 17 comienza con una temperatura de la habitación en torno a los 32 °C respecto de los 34 °C que se apreciaban al comienzo del día 15.

- 22 - 25 julio de 2023

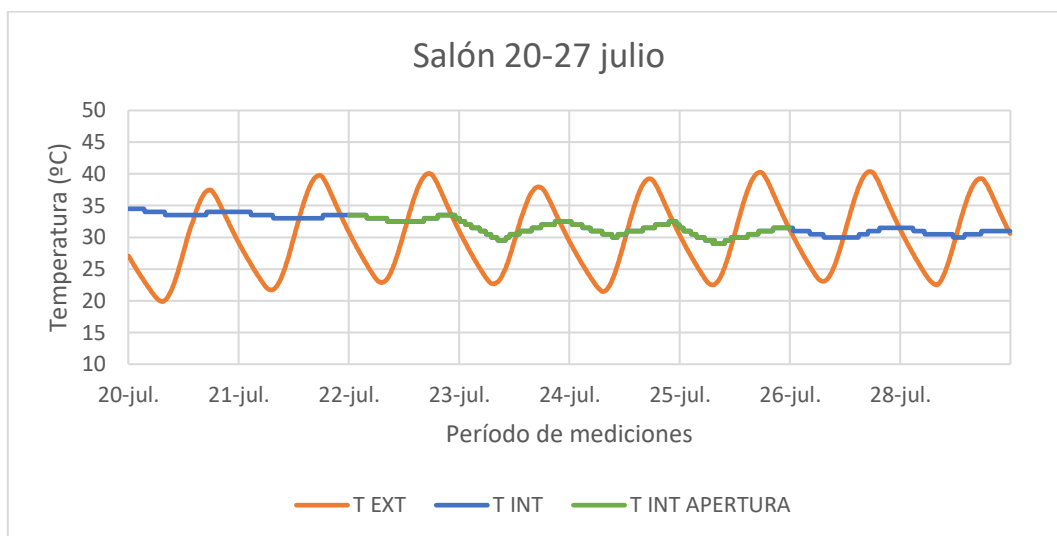


Figura 10: Período 20-27 de julio en salón

Esta es la primera muestra que se tiene con varios días de apertura, en concreto cuatro días. En cuanto a las temperaturas exteriores, estas caen durante los dos primeros días de apertura, pero suben en los dos últimos días. Sin embargo, la tendencia de las temperaturas interiores se mantiene siempre a la baja,

habiendo comenzado con un valor de 33,5°C en la madrugada del 22 de julio y terminando con un valor de 31,5°C en la madrugada del 25 de julio. Esto prueba que la técnica de la ventilación nocturna reduce en dos grados la demanda de refrigeración para este espacio. No se debe obviar el efecto acumulador puesto que, si bien las temperaturas exteriores son bastantes homogéneas entre los días 20 y 27 de julio, las temperaturas interiores en la madrugada del 20 de julio son de alrededor de 35°C mientras que las temperaturas durante el día 27 se encuentran más próximas a los 30°C, lo que supone una diferencia de 5°C.

- 29 julio – 1 agosto de 2023

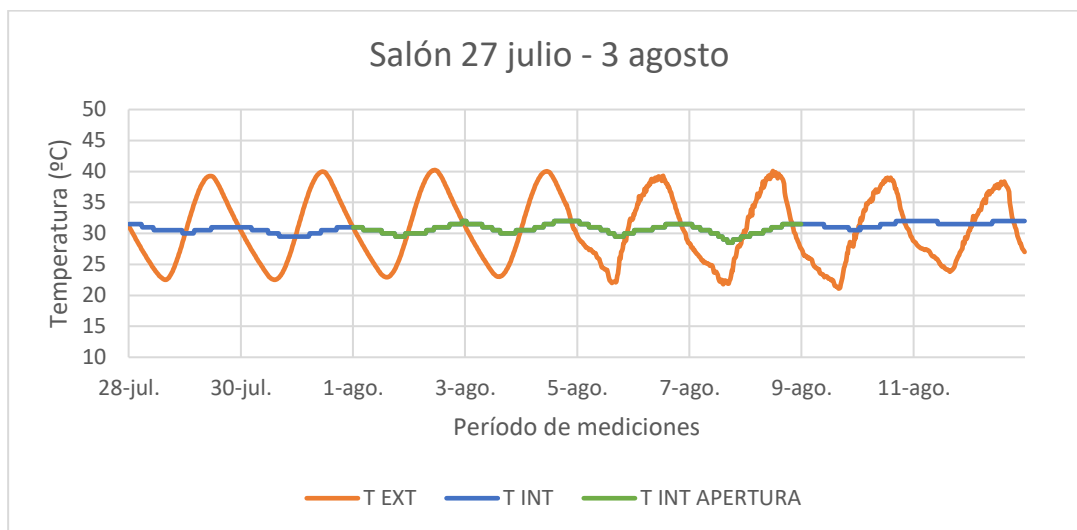


Figura 11: Período 27 de julio – 3 de agosto en salón

Con unas máximas exteriores cercanas a los 40°C, como ocurría en el período anterior, en la Figura 11 se observan unas temperaturas interiores que oscilan entre los 32°C y los 29,5°C durante los días de apertura. Este rango difiere en un grado y medio de las máximas y en dos grados de las mínimas presentadas en el período entre el 20 y el 27 de julio, consecuencia de la proximidad temporal con el anterior período de apertura (las ventanas se cierran tan solo dos noches entre ambos períodos) y prueba fehaciente de la inercia térmica como almacenamiento de energía.

3.1.6 Segunda planta. Habitación fachada (Sensor 10)

En este caso, las medidas se recogen desde el 2 de julio a las 17:20 h hasta el 1 de octubre a las 17:10 h.

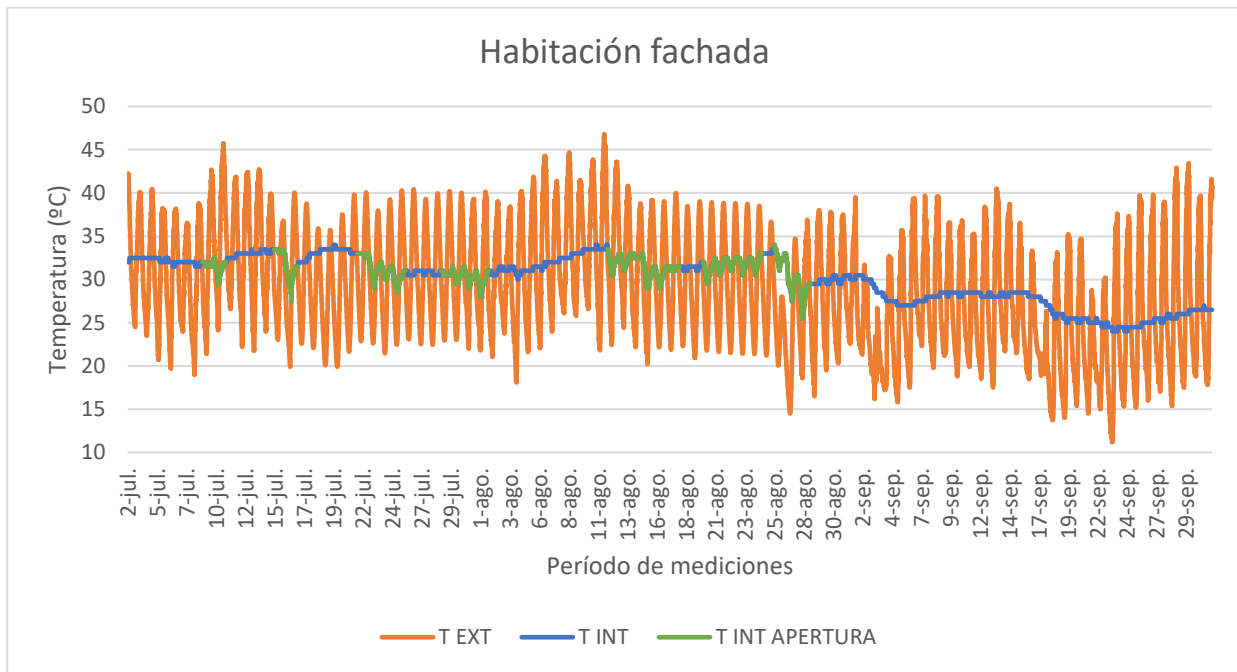


Figura 12: Temperatura interior medida en la habitación fachada y temperatura exterior

En esta estancia, se reprodujo durante los meses de julio y agosto el experimento de la ventilación nocturna que se ha detallado en el capítulo 2 Descripción del entorno de trabajo y experimentación. Los experimentos tenían una duración variable, con las que se pudieron observar distintos fenómenos cada vez y que coinciden con las mediciones indicadas en verde en la Figura 12. A continuación, se muestran detalladamente las gráficas de algunos los períodos en los que se ha producido ventilación nocturna, junto con unos días precedentes y posteriores para poder observar el cambio que se produce al abrir las ventanas. El resto de los períodos se pueden encontrar en el *ANEXO B. ANÁLISIS CUALITATIVO ZONAS EXTRA*, ya que los aspectos más destacables ya se habían comentado.

- 9 - 10 julio de 2023

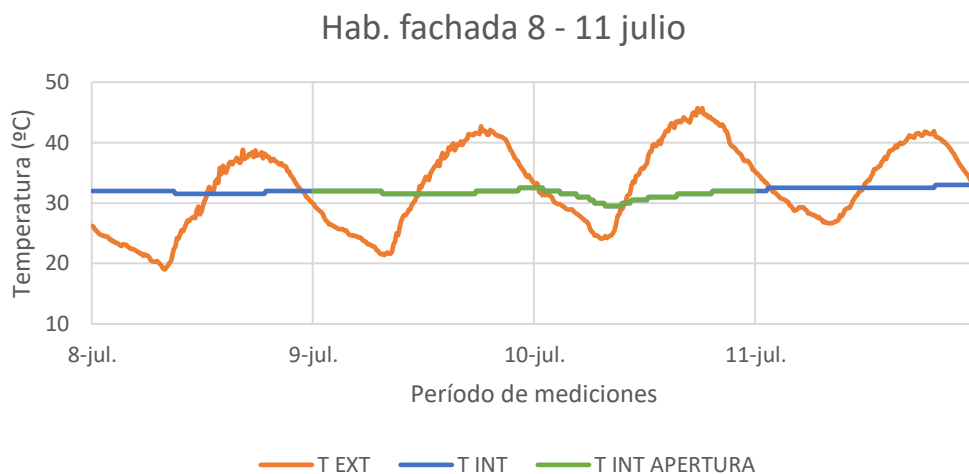


Figura 13: Período 8-11 de julio en habitación fachada

En este caso la ventana se abre tan solo una noche entre el 9 y el 10 de julio y respecto a los días anteriores donde la curva es mucho más plana, se observa una caída de las temperaturas incluso por debajo de los 30°C alrededor de la mañana del 10 de julio pese a que las temperaturas exteriores aumentaban.

- 15 - 16 julio de 2023

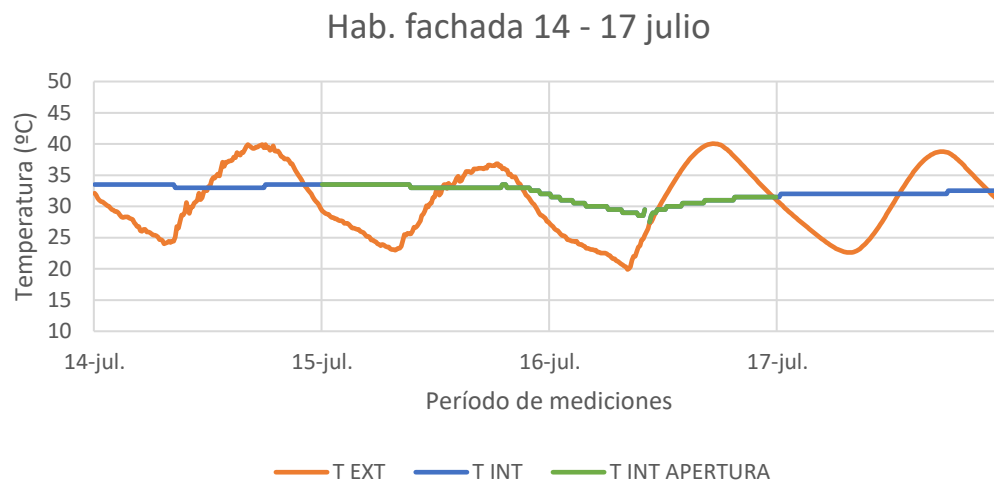


Figura 14: Período 14-17 de julio en habitación fachada

Como en el caso anterior, solo se abre una noche y se puede observar claramente como la curva de esa noche (en verde) cae, alcanzando una mínima de entorno a los 27 °C alrededor de las 12 h. Es interesante observar el decalaje entre las mínimas exteriores que se producen en torno a las 8 h, antes de la salida del sol, y las mínimas en la habitación. Esta es una prueba inequívoca de la inercia térmica actuando como almacenamiento de energía. Se puede percibir también un efecto a largo plazo de la apertura nocturna de las ventanas, puesto que, aunque las máximas exteriores de los días 14 y 16 sean parecidas, el día 17 comienza con una temperatura de la habitación en torno a los 31,5 °C respecto de los 33,5 °C que se apreciaban al comienzo del día 15.

- 22 - 25 julio de 2023

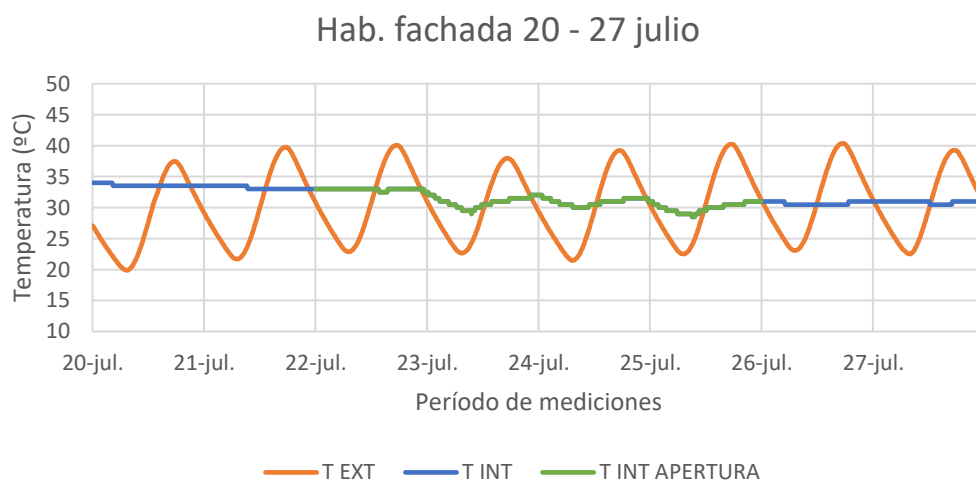


Figura 15: Período 20-27 de julio en habitación fachada

En este caso, se abren las ventanas cuatro días. En cuanto a las temperaturas exteriores, estas caen durante los dos primeros días de apertura, pero suben en los dos últimos días. Sin embargo, la tendencia de las temperaturas interiores se mantiene siempre a la baja, habiendo comenzado con un valor de 33°C en la madrugada del 22 de julio y terminando con un valor de 31°C en la madrugada del 25 de julio. Esto prueba que la técnica de la ventilación nocturna reduce en dos grados la demanda de refrigeración para este espacio. En las temperaturas interiores, se observa como la primera noche de apertura, aunque cae levemente la temperatura, no se observa el rango entre máximas y mínimas de alrededor de 3°C que se observa el resto de días. Esto puede ser debido al efecto de la inercia, pero en este caso como una resistencia del edificio a adoptar las condiciones exteriores, aunque sean beneficiosas.

- 29 julio – 1 agosto de 2023

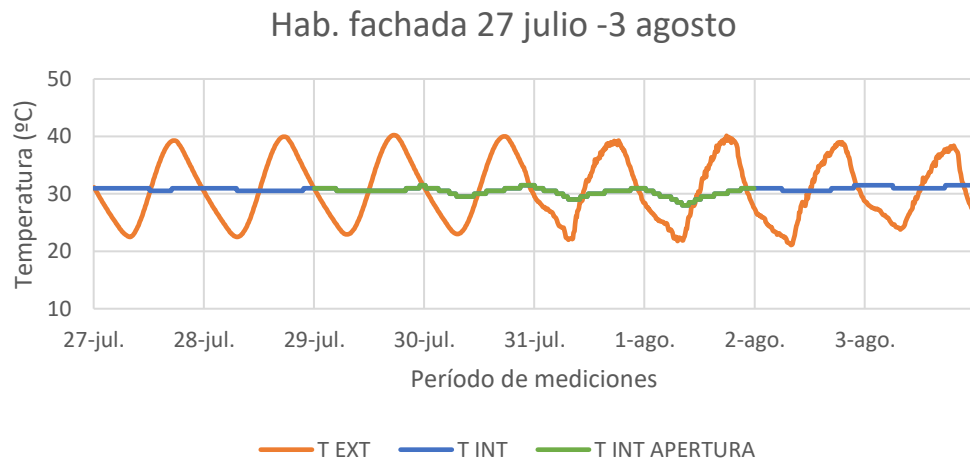


Figura 16: Período 27 de julio – 3 de agosto en habitación fachada

Se observa en la Figura 16 como las temperaturas interiores oscilan entre los 28 °C y los 31 °C en un período de ocho días, sin demasiadas variaciones bruscas, fruto de la cercanía con la que se realizan las ventilaciones nocturnas, el anterior período terminaba el 25 de julio, que preserva esa temperatura más fresca. Como ocurría en la Figura 15, durante la primera noche, el edificio rehúsa a acercarse a la temperatura exterior dada la inercia de este.

3.2 Discusión de los resultados

A continuación, se mostrarán las comparaciones de algunos casos que se han considerado de especial interés.

3.2.1 Comparación oficina interior con otras habitaciones

En la Figura 17 se compara la oficina con otras habitaciones de estudio en las que no se ha hecho el experimento de ventilación nocturna.

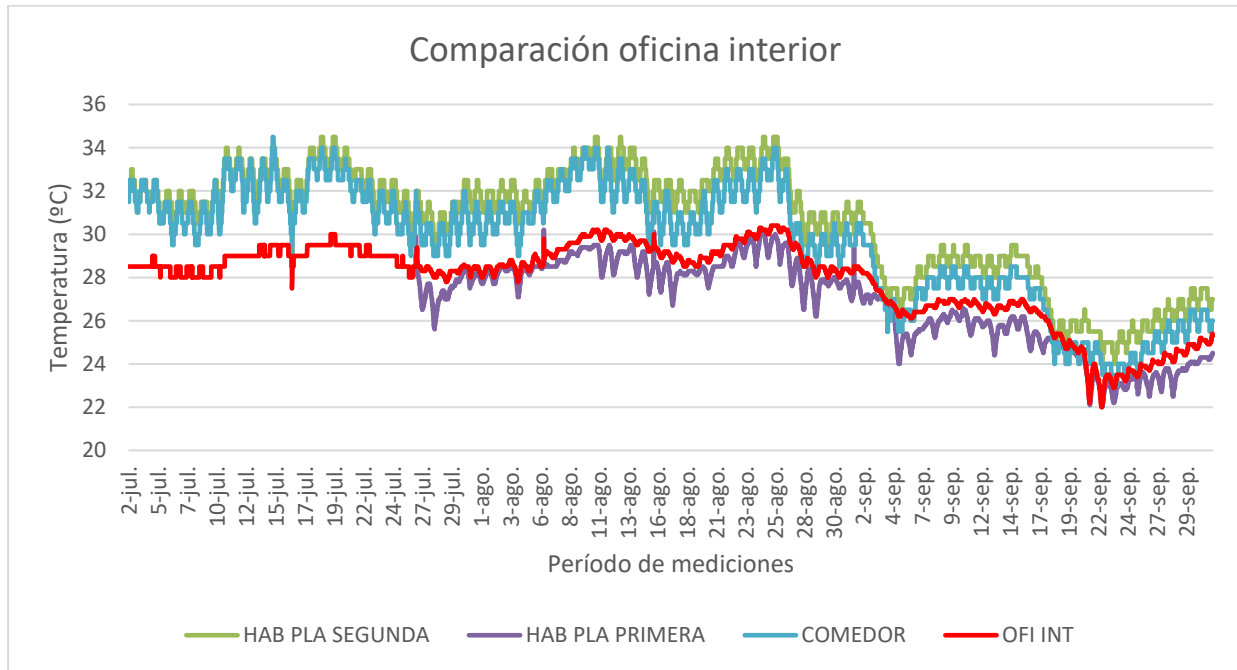


Figura 17: Comparación oficina interior con otras habitaciones

Como se puede observar, la temperatura de la oficina, en rojo, es la que se muestra más invariable durante el día, es decir, la diferencia entre las mínimas y las máximas diarias es muy poco notable, tan solo alrededor de 0,5 °C. Esto se debe a las condiciones de operación de esta habitación, ya que permanece a oscuras todo el tiempo y no suele estar habitada ni entrar personas, por lo que no se generan corrientes de aire que puedan alterar esta temperatura. Sin embargo, en la habitación que se encuentra en el mismo plano y a escasos metros de la oficina, la dicha habitación de la planta primera (en la ilustración, en morado), se observa una diferencia entre las máximas y mínimas más abrupta, así como en general, unas temperaturas mínimas alrededor de 2 °C más bajas. Por otra parte, también se puede observar como las temperaturas en las habitaciones situadas en la segunda planta (en azul y verde) son, sin lugar a duda, más altas y además reaccionan más bruscamente a los cambios en las condiciones exteriores. Ambas circunstancias son consecuencia de que estas habitaciones tengan unas condiciones de contorno más desfavorables. Por una parte, tienen la cubierta caracterizada por una baja inercia y expuesta directamente a la radiación directa del sol y, por otra parte, la proximidad de estas habitaciones con el patio que, en la segunda planta, alcanza unas temperaturas mucho más altas. Este último detalle se explicará mejor en la siguiente comparación. Las dos habitaciones de la planta segunda presentan unas demandas energéticas en régimen de refrigeración mucho más elevadas que las habitaciones de la planta de abajo.

3.2.2 Comparación entrada patio con ventana

A continuación, se muestra en la Figura 18, la comparación de las medidas recogidas por los dos sensores que están situados en el patio.

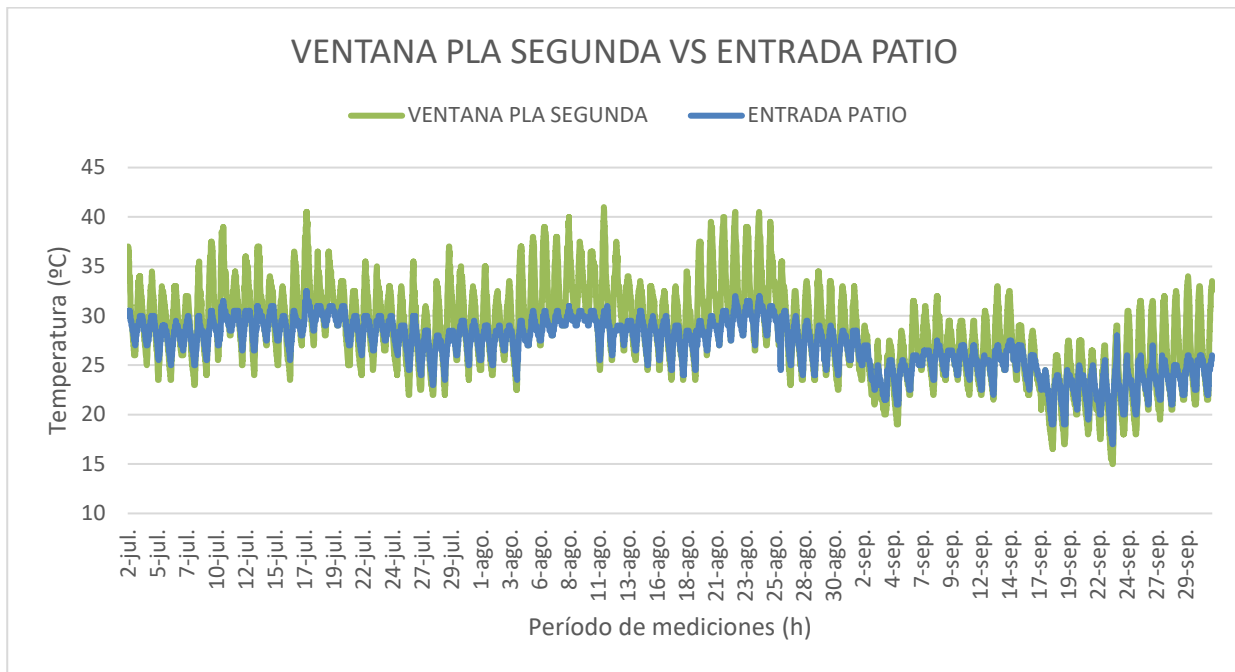


Figura 18: Comparación ventana de la planta segunda con entrada patio

Como se puede observar en la Figura 18, aunque ambos se encuentran en el entorno del patio, el sensor 6 (ventana) difiere de los datos recogidos por el sensor 4 (entrada patio), puesto que el presente sensor no se encuentra protegido por el soportal, aunque si lo hace por un toldo en las horas de mayor radiación y, además, está instalado en la segunda planta. Además, en el *ANEXO C. MODELO FLUIDODINÁMICO DE LA VENTILACIÓN*, se incluye el estudio de los vórtices de aire existentes en el patio y como el que se sitúa en la zona superior del patio impide el paso de aire caliente de la calle al interior de la vivienda.

Gracias a los experimentos y estudios realizados, se puede constatar la diferencia a nivel confort térmico que existe entre ubicarse en la primera o en la segunda planta de la casa. Por ello, se puede comprender la decisión de utilizar en verano la planta baja y viceversa durante el invierno. Este hecho, no se da tan solo en esta vivienda, si no que se recoge también en el PGOU del Excelentísimo Ayuntamiento de Écija “Las viviendas tradicionales del casco antiguo tienen una doble vivienda: la de invierno, en la planta superior, y la de verano, en la planta inferior, más fresca, por la inercia térmica de sus muros de tapial y la ventilación del patio.” (Excelentísimo Ayuntamiento de Écija, 2009).

3.2.3 Comparación habitación fachada con salón

En la Figura 19 se muestran los datos recogidos por los sensores situados en las estancias en las que se ha realizado el experimento de ventilación nocturna.

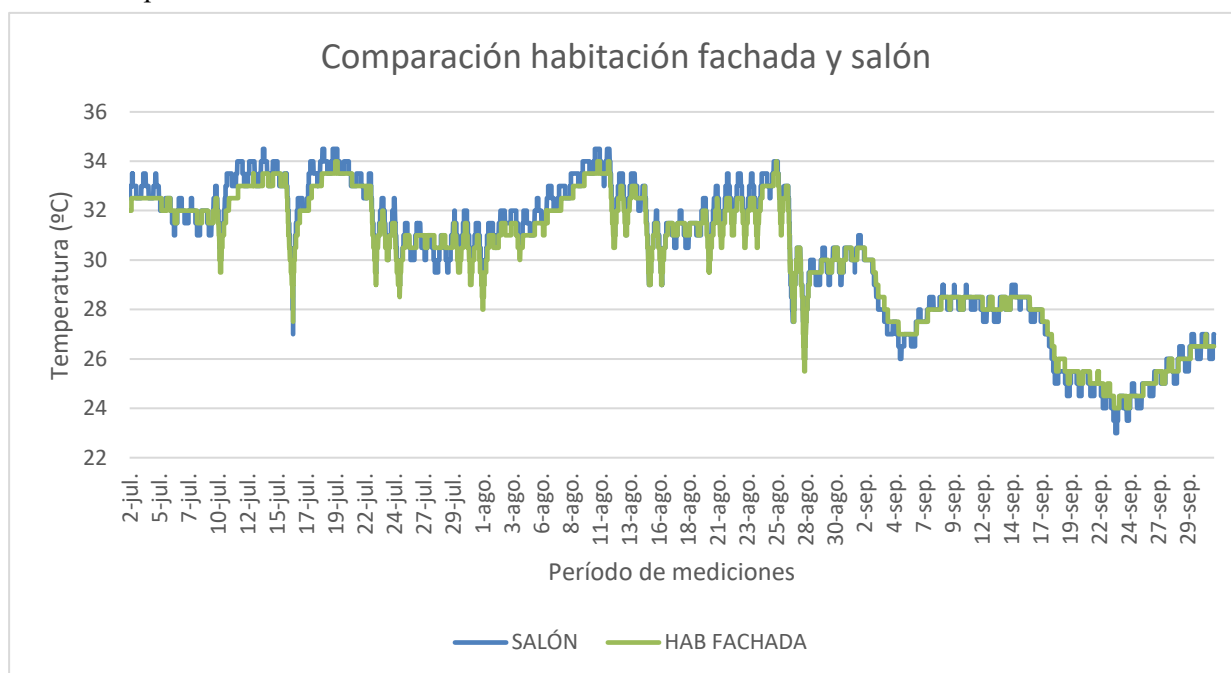


Figura 19: Comparación habitación fachada con salón

En ambas dependencias se realiza durante los meses de julio y agosto, antes de la línea divisoria, los experimentos de ventilación nocturna y en la Figura 19, se puede observar como las temperaturas que se registran en la habitación son, en general, más bajas que las que se registran en el salón. Esto implica que, frente a un caudal de ventilación parecido, puesto que las ventanas son similares, a mayor superficie de contacto del aire con las paredes, como es el caso del salón, la posibilidad de alcanzar temperaturas más bajas gracias a la ventilación nocturna se reduce. Se recoge también en el *ANEXO C. MODELO FLUIDODINÁMICO DE LA VENTILACIÓN* el contour de temperaturas de ambas estancias para cuando se produce ventilación nocturna, con temperaturas más bajas en la habitación respecto al salón. Además, los casos en los que en el salón se registran temperaturas más bajas que en la habitación, están seguidas de bajadas de temperaturas aún más notables en la habitación y eso puede estar debido a que existe una mayor masa de los elementos que constituyen el espacio respecto al espacio habitable, por lo que tiene más inercia, responde más lentamente a los cambios. Esto se ha puesto de manifiesto en las Figura 14 y Figura 15, mientras que, en los períodos análogos en el salón, representados en las Figura 9 y Figura 10, no se ponía. A partir del mes de septiembre, no se vuelven a hacer los experimentos de ventilación y las temperaturas de ambos espacios se muestran más parecidas, aunque las temperaturas registradas en la habitación se mantienen en un rango mucho más restringido, presentando una mayor amortiguación gracias a las características enumeradas en el párrafo anterior, respecto de las temperaturas en el salón.

4 ANÁLISIS CUANTITATIVO

Para poder comprobar algunas hipótesis, se utiliza HULC, donde se modela parte del edificio. HULC es un programa que utiliza el estado transitorio, junto con un escalón temporal de una hora para sus simulaciones y ha pasado las condiciones de aceptación de procedimientos alternativos a LIDER y CALENER (IDAE, 2009). Además, utiliza los archivos oficiales proporcionados por el Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (IDAE, 2009).

El objetivo es obtener con esta herramienta un modelo con el que poder establecer diferentes condiciones de operación a aquellas que se han establecido en la experimentación y obtener la comprobación de las hipótesis que se barajan acerca de la efectividad de la técnica de la ventilación nocturna. Las partes que se han modelado son las conocidas como “oficina” y “habitación fachada”. Esta última es una de las estancias en la que se ha producido la ventilación nocturna. Ambas estancias son correlativas, compartiendo el forjado como techo o suelo respectivamente.

Para poder realizar esta simulación, es necesario en primer lugar introducir los materiales y elementos con los que está hecho el edificio y, en segundo lugar, realizar la descripción geométrica de los espacios a modelar. Los detalles de la simulación se pueden encontrar en el *ANEXO D. ENTORNO DE SIMULACIÓN*. En este capítulo se tratarán los resultados tras implementar los cambios comentados en dicho anexo.

4.1 Validación de las características y condiciones operacionales

La importancia de la validación de los resultados de las simulaciones reside en la necesidad de obtener un modelo con el que poder establecer diferentes condiciones operacionales para un edificio del que se desconoce la construcción exacta, como es el caso que ocupa. Se utilizan los datos recogidos durante la campaña de monitorización para construir este modelo alterando distintos parámetros hasta obtener magnitudes, en este caso, la temperatura, que sean parecidas tanto en la realidad como en la simulación.

4.1.1 Períodos de validación sin ventilación

Los resultados que se mostrarán a continuación han sido obtenidos para unas condiciones con infiltraciones nulas; absortividad de la cubierta igual a 0,6; construcción igual al caso inicial y con un peso del mobiliario equivalente a 500 kg/m² para la oficina y a 1000 kg/m² para la habitación. En la Figura 20 se muestra el caso para la oficina durante el primer período del 4 al 11 de agosto.

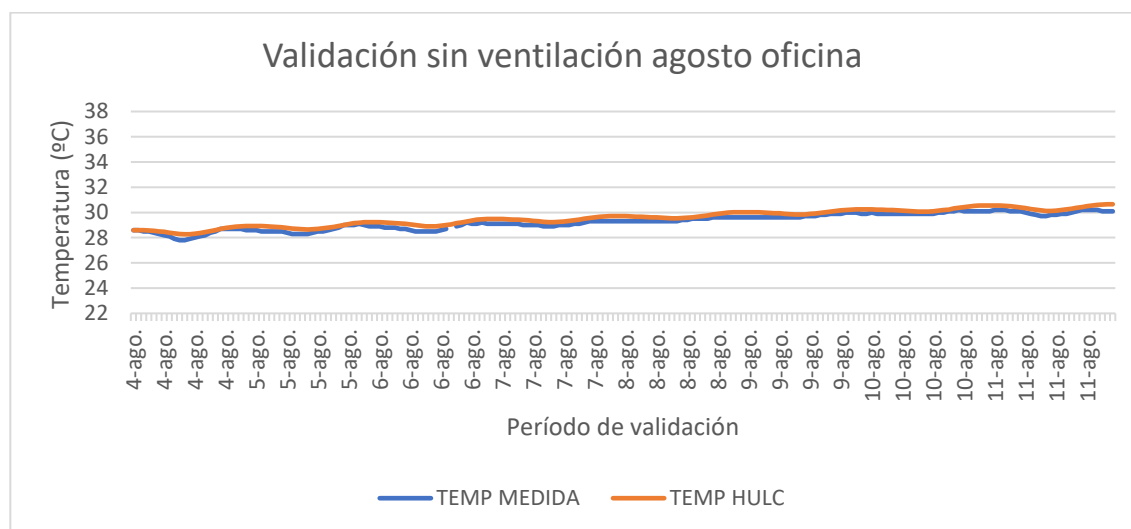


Figura 20: Validación sin ventilación agosto oficina

La mayor de las diferencias que se observaba entre los resultados de la anterior simulación y los datos medidos, que era un rango entre temperaturas máximas y mínimas mayor de 5°C para las temperaturas obtenidas en HULC, ya no se observa en absoluto. El rango entre las máximas y mínimas diarias se consolida alrededor de 1°C. Se muestra en la Figura 21 el mismo período de validación para la habitación de la segunda planta.

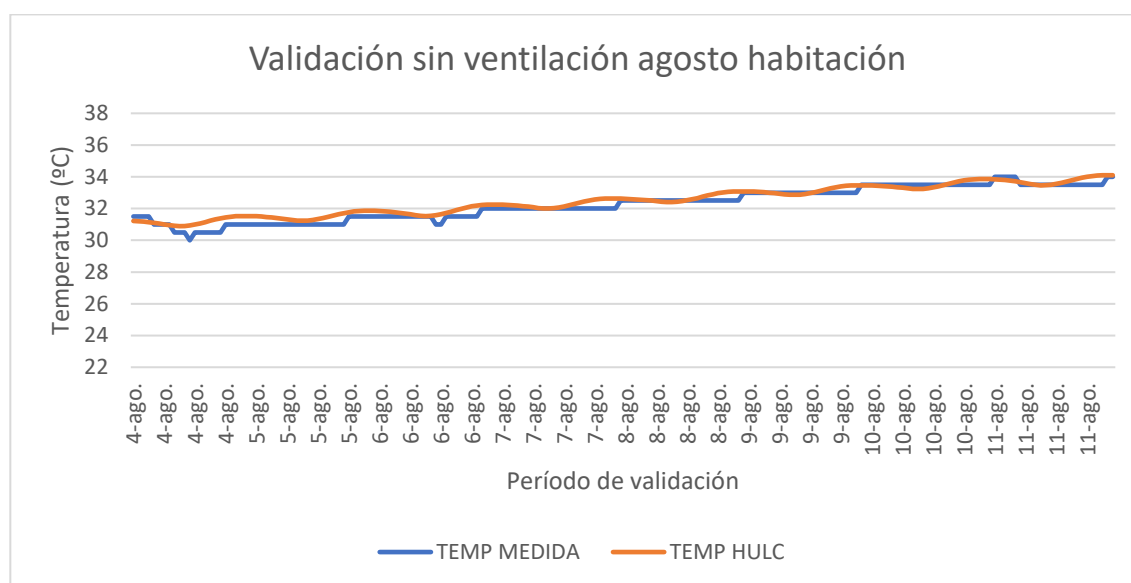


Figura 21: Validación sin ventilación agosto habitación

Lo que más preocupaba en el caso de la habitación en la anterior simulación eran las elevadas temperaturas máximas diarias, mucho más acentuadas que las mínimas. Para evitar esta situación se decidió optar por una absorptividad más baja en la cubierta, estableciéndose en 0,6. En la Figura 21, se puede comprobar como el objetivo se ha cumplido puesto que ya no existen esas máximas tan elevadas. Además, como ocurría en el caso de la oficina, el cambio en la inercia de la vivienda permite que en el interior de esta se amortigüen los cambios de temperatura que se deben a las excitaciones exteriores.

Después del éxito de los cambios durante el primer período de validación, en la Figura 22 se muestran los resultados de la oficina para el segundo período desde el 7 al 16 de agosto.

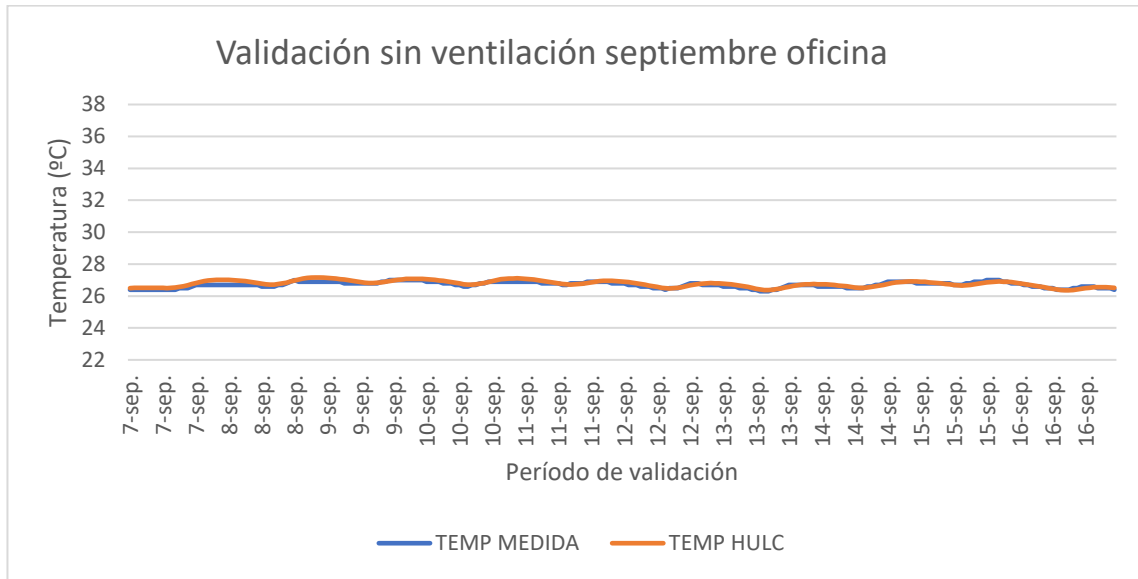


Figura 22: Validación sin ventilación septiembre oficina

Para este período también parece ocurrir que los cambios en la inercia, introducidos por medio del mobiliario, hayan incurrido en una mejor aproximación a los datos medidos. Se muestran también los resultados para la habitación de la segunda planta en la Figura 23.

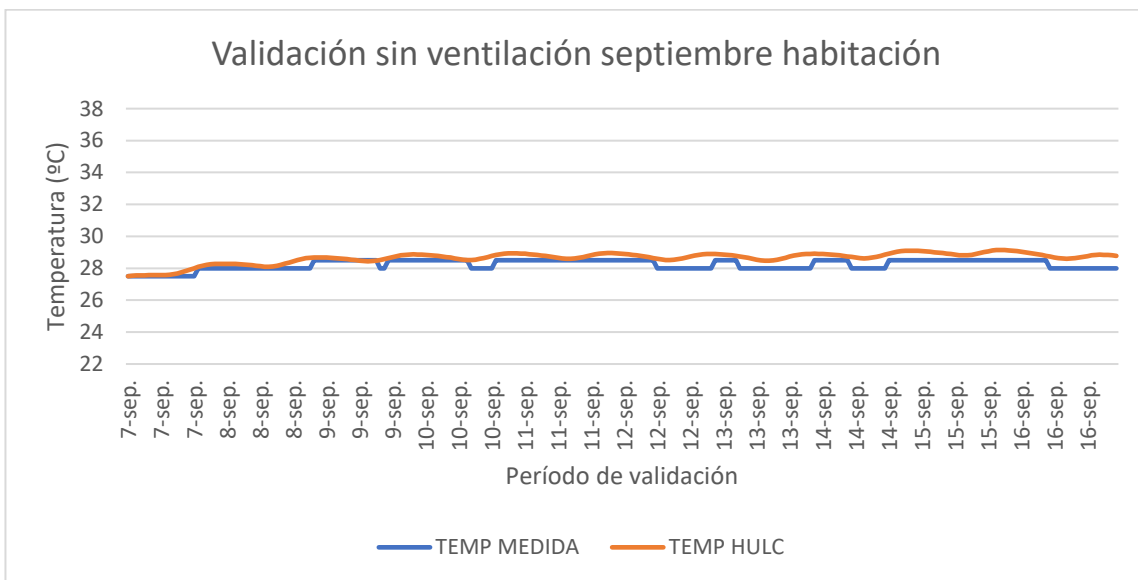


Figura 23: Validación sin ventilación septiembre habitación

La aproximación en esta última figura es menos exacta a la realidad, pero en comparación con los resultados obtenidos tras la primera simulación, la diferencia es notoria. Cabe destacar el hecho de que HULC entrega los resultados con cuatro cifras significativas, mientras que el sensor Omega tiene una resolución de 0,5 °C. Esta condición convierte la tarea de aproximar ambas temperaturas, medidas y simuladas, aún más complicada. En el caso de la oficina, al haberse utilizado el sensor Elitech, con una resolución de 0,1 °C, se facilita el hecho de que ambas temperaturas casen. Sin embargo, para poder validar el comportamiento de la vivienda con los resultados que se han obtenido es suficiente, ya que recogen aspectos tales como la inercia y con ella la amortiguación de la excitación exterior, aspecto clave en la descripción de la vivienda. Además, las temperaturas se encuentran siempre cerca de los 28 °C.

4.1.2 Período de validación con ventilación

Una vez confirmada la validación para los períodos sin ventilación, se procede con la validación de los períodos con ventilación. Para ello, es fundamental el conocimiento del caudal de aire que entra por la ventana cuando se procede con la ventilación nocturna. Esta tarea es bien difícil por distintas razones. La primera de ellas es que durante los días en los que se realiza la validación no se tienen datos de velocidad del viento in situ, ya que el anemómetro fue instalado más tarde. La velocidad del viento que se extrapola a partir de los datos medidos durante agosto y de los datos de SIAR permite trabajar con un rango de valores que se introducirán en HULC hasta encontrar cuál es el caudal con el que se consigue un comportamiento de la vivienda más próximo a la realidad. La segunda es que HULC no permite la inclusión de una ventilación para cada uno de los días del año, por lo tanto, hay que escoger un caudal que funcione para la mayoría de los días y que no comprometa demasiado al resto.

En primer lugar, se realizaron las simulaciones con un caudal de 12 ren/h y, más tarde, con un caudal de 14 ren/h, para el cual el comportamiento del edificio en la simulación se aproximaba bastante al observado durante la campaña de monitorización. En la Figura 24 se muestra la validación entre el 22 y el 25 de julio para un valor del caudal de ventilación de 14 ren/h.

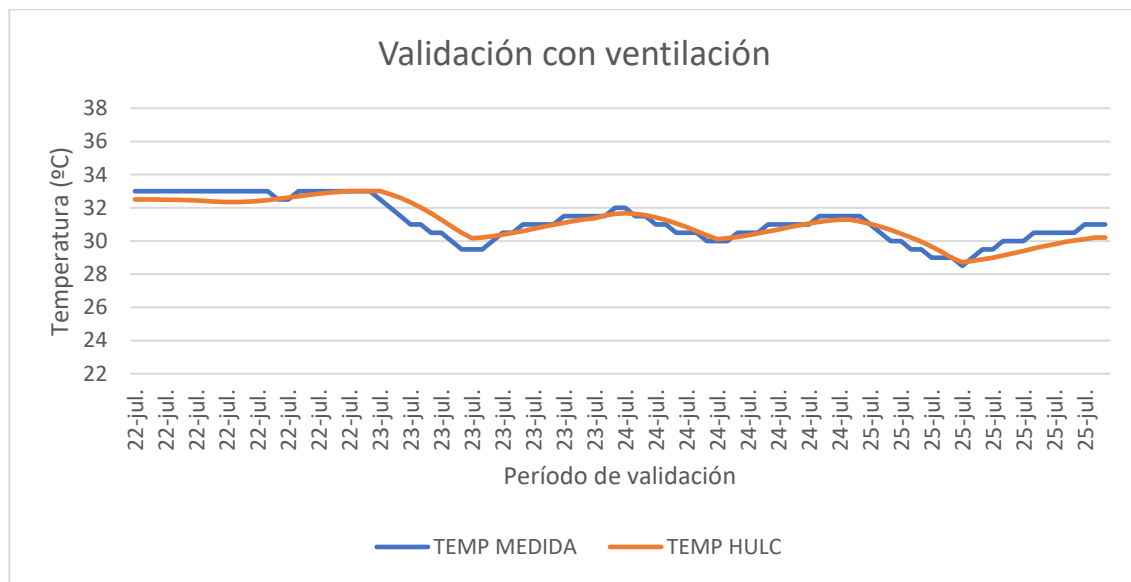


Figura 24: Validación con ventilación

Como se puede observar, el valor de 14 ren/h permite que tanto la temperatura tomada durante la campaña de monitorización y la obtenida tras la simulación se asemejen bastante.

4.2 Eficiencia de la ventilación

Tras obtener la validación de las características que modelan el edificio, el resultado es un modelo que permite probar cual sea condición de operación. La condición operacional estrella es la ventilación nocturna. Esta técnica es ampliamente utilizada en los hogares andaluces durante la temporada estival y a partir del modelado de esta vivienda, que además cuenta con patio, se puede demostrar de forma técnica la efectividad de la técnica que ha ido pasando de generación en generación, pasando a formar parte de la cultura e idiosincrasia del lugar.

El período de tiempo que se ha elegido para mostrar la influencia de la ventilación sobre la temperatura es desde el 20 de julio al 9 de agosto, aunque bien se podrían haber elegido otros días, ya que, gracias a la validación de la simulación, cualquier día se hubiese podido elegir.

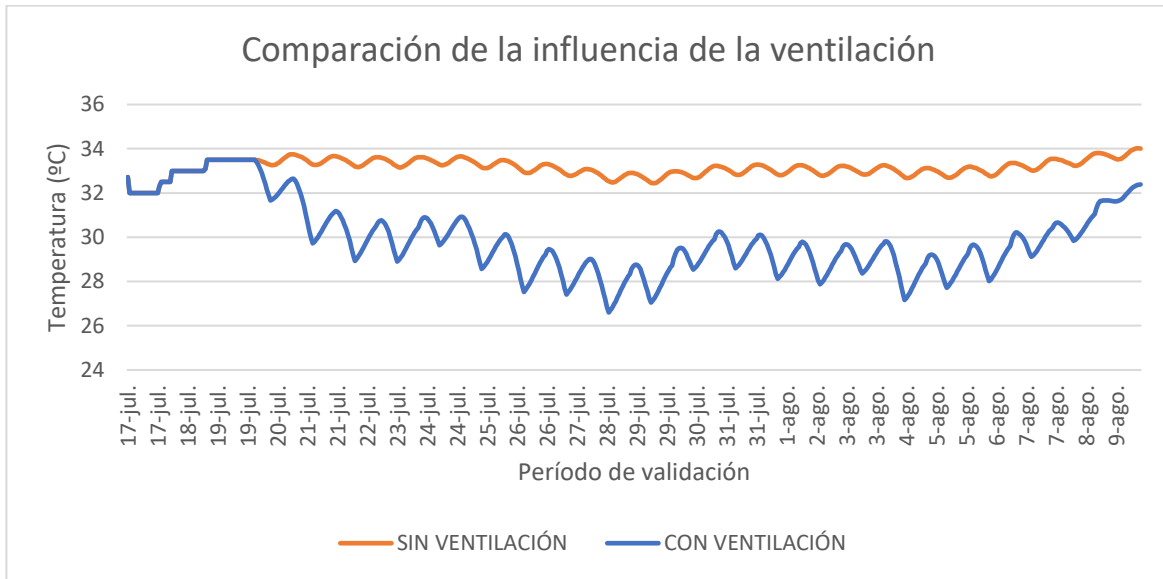


Figura 25: Comparación influencia de la ventilación

En la Figura 25, se muestra el período en el que se realiza ventilación nocturna, a partir del 20 de julio, y, además, se muestran los tres días precedentes a la apertura de las ventanas cuyas temperaturas están forzadas a las obtenidas durante la monitorización. Se han representado las dos casuísticas, es decir, la situación en la que no se procede con la ventilación nocturna, en color naranja y la situación en la que si ocurre. Se muestra también la Figura 26, que añade la temperatura exterior, para poder conocer cuál ha sido la relación entre las variables.

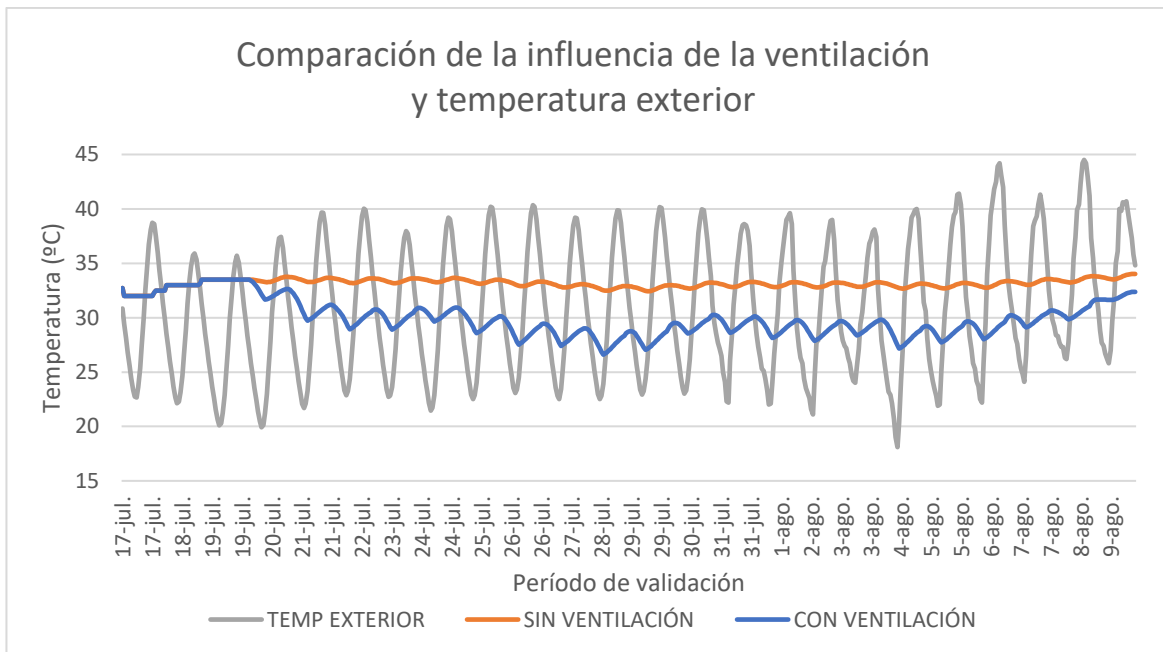


Figura 26: Comparación influencia de la ventilación y temperatura exterior

Para la situación en la que no se abren las ventanas y puertas que conectan con el patio, la temperatura de la habitación no se ve tan afectada por las excitaciones exteriores, puesto que la diferencia entre máximas y mínimas diarias ronda el grado. Por ejemplo, se muestra como durante el 4 de agosto se produjo una bajada de temperaturas significativa, pero el comportamiento de la estancia se aprecia parejo al de días anteriores. De media, la temperatura para el período está en torno a los 33 °C, siendo la inercia del edificio la que permite esta regularidad en las temperaturas como se ha comentado anteriormente.

Una situación muy diferente es la que se observa en el caso para el que se abren las ventanas, puesto que las temperaturas interiores responden a las excitaciones del exterior, ya que se expone a este cuando se abren las ventanas. Es muy importante saber cuál es el período en el que exponer la estancia y la vivienda a las condiciones

exteriores, ya que la intención es abrir las ventanas cuando la temperatura en el exterior sea más baja que en el interior, es decir, cuando las condiciones exteriores sean más favorables que en el interior en el caso del régimen de verano. Ese momento ocurre entre la puesta de sol, sobre las 9 de la noche y unas pocas horas después del amanecer, como máximo a las 10 de la mañana. Los resultados de la aplicación de esta técnica se traducen en una reducción de las temperaturas en el interior de la vivienda. La diferencia más amplia entre ambas situaciones se observa para el día 28 de julio a las 9 h, donde la diferencia de temperatura alcanza los 5,93 °C. La diferencia más reducida entre una y otra es de al menos 1 °C y se aprecia durante los primeros días de apertura, en los que la vivienda se rehúsa a cambiar el estado en el que se encontraba cuando las ventanas y puertas no se abrían. En este caso, la inercia de la vivienda reduce los beneficios que supone la inercia térmica, ya que se demora unos seis días hasta que llega a colocarse en la banda de entre los 30 °C y los 25 °C, exactamente hasta el día 26 de julio.

Sin embargo, la inercia también puede tener efectos positivos cuando se combina con la ventilación nocturna. En la Figura 27 se muestra el mismo período de ventilación en el recuadro rojo y el efecto de esta técnica no solo en los días de apertura, si no en los días siguientes. Gracias a la inercia es que el edificio no vuelve súbitamente al comportamiento cuando no hay ventilación nocturna, si no que no es hasta el 5 de septiembre que las temperaturas se recuperan de este período de ventilación.

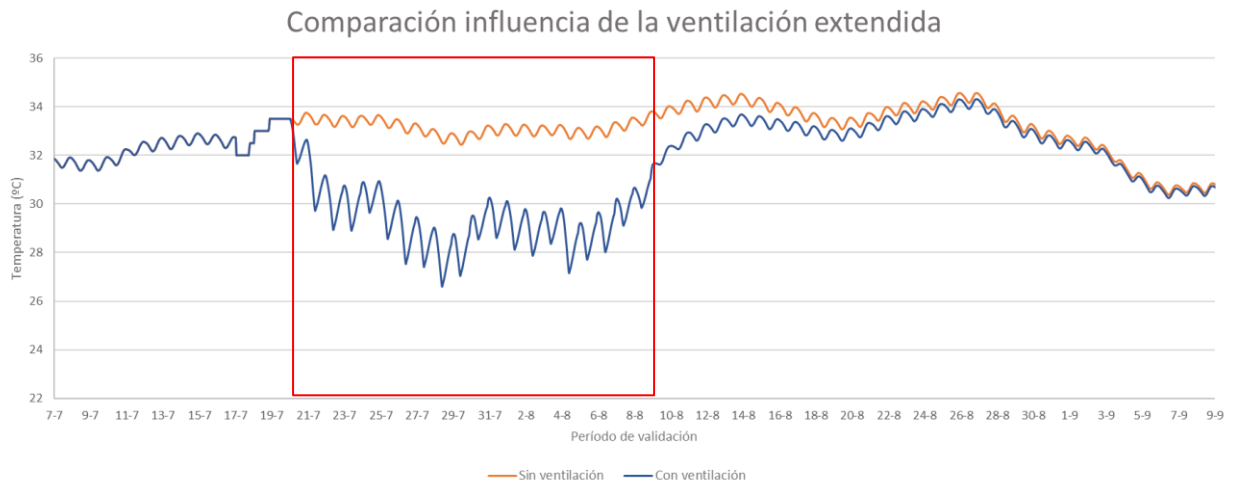


Figura 27: Comparación influencia de la ventilación extendida

Desde el último día de ventilación, el 9 de agosto, hasta el 5 de septiembre, transcurren veintisiete días. Este es un magnífico dato sobre la inercia del edificio. Un período de ventilación nocturna de veinte días tiene un efecto que dura hasta veintisiete días después del último día de ventilación. Esto supone que unos días de ventilación nocturna en conjunto con el efecto de la inercia, pueden proporcionar hasta un 135% más de acondicionamiento de la vivienda y por lo tanto reducción total o parcial de la demanda de refrigeración. Este acondicionamiento se produce gracias a una técnica pasiva de reducción de energía, con lo cual es completamente gratuita y sostenible. Este efecto acumulativo de la inercia ya se pudo observar también en la Figura 14 del apartado 3.1.6. Segunda planta. Habitación fachada (Sensor 10).

Además de todo lo comentado acerca de la inercia, otra ventaja de su efecto es que, aunque existan unos días más desfavorables, no sume al edificio en un comportamiento caótico, si no que resiste esas cortas oleadas y amortigua su efecto sobre las estancias de la construcción. Esto se puede observar durante el día 6 de agosto en la Figura 26, en el que se sufrieron unas máximas de hasta 3 °C por encima del día anterior, alcanzando los 43°C. Sin embargo, esta excitación no produjo un incremento en la temperatura interior de 3°C, si no que tan solo hubo una diferencia de 1°C entre esa noche y la anterior. La inercia permite que el comportamiento térmico del edificio esté sujeto a la tendencia que sigue el clima, en vez de a los eventos puntuales.

Aunque hasta ahora se han apreciado los aspectos generales de la ventilación nocturna o su influencia a largo plazo, es menester hacer hincapié en el beneficio que supone, aunque sea para tan solo un día, esta técnica. Se muestra en la Figura 28, las temperaturas para ambas opciones en el día 28 de julio, uno de los días en los que se hizo ventilación nocturna.

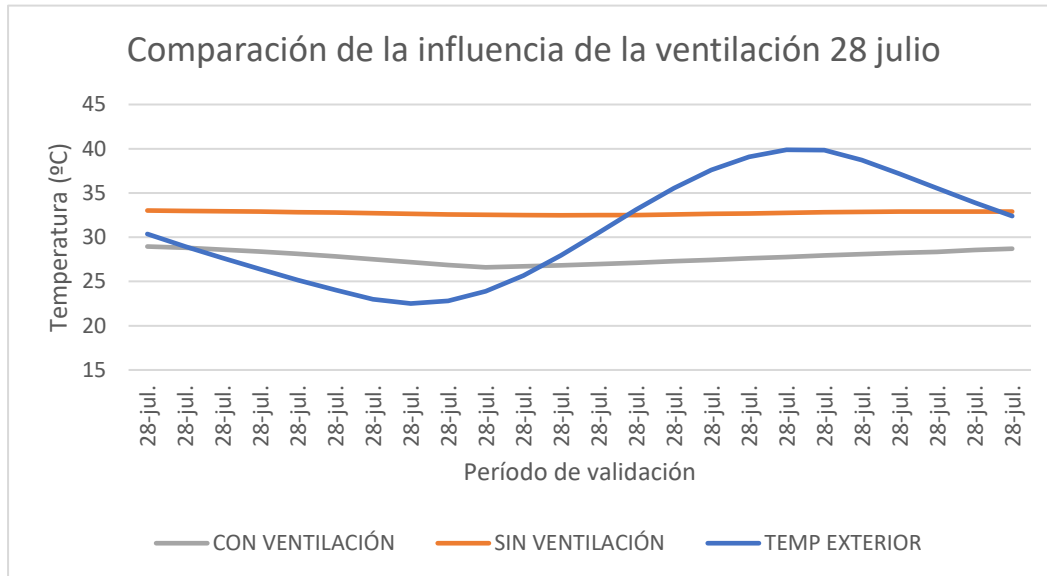


Figura 28: Comparación de la influencia de la ventilación 28 julio

En este día, la máxima exterior se dio a las 17 h, con 39,9 °C. Si el escenario hubiese sido el que no tiene ventilación, las temperaturas que se dan en el espacio a esa hora son 32,8 °C, mientras que en el escenario en el que existe ventilación nocturna, para la hora más calurosa del día, la temperatura del espacio sería tan solo de 27,8 °C. Esto son 12,1 °C menos que la temperatura exterior y, además, se obtiene una temperatura muy cercana a la temperatura considerada de confort en verano, que son los 25 °C. Este es el mejor ejemplo de que la combinación de una arquitectura vernácula con condiciones operacionales que se han transmitido de generación en generación, permite una reducción de la demanda de energía en los edificios.

5 CONCLUSIÓN

AL comienzo de este trabajo, se propuso que algunas técnicas, como la ventilación nocturna o el adecuado control solar, y algunos elementos constructivos, como los patios o el uso de tapial, consiguen que la experiencia en la casa en estudio, en cuanto al confort térmico se refiere, sea más que satisfactoria. Además, cabe destacar que todos ellos se localizaron dentro del marco de la arquitectura vernácula de Andalucía. La justificación técnica de los efectos que la aplicación de estos elementos y técnicas tiene sobre la mejora del confort térmico se muestra en este capítulo.

Tras los experimentos y estudios que se han descrito en los anteriores capítulos, así como de sus análisis, se deducen una serie de conclusiones. La primera de todas ellas es que la inercia que se consigue gracias a los elementos masivos es crucial en el comportamiento de la vivienda y que cualquier decisión respecto de las condiciones operacionales que se tome durante el disfrute de esta, viene condicionada en tiempo por la inercia térmica propia de la casa. Así, por ejemplo, al utilizar el recurso de la ventilación nocturna, gracias a la inercia, sus beneficios se veían prolongados hasta en un 135%. Se manifiesta por tanto como una técnica de almacenamiento energético, en este caso, térmico. El almacenamiento energético es un recurso que debe utilizarse para poder asegurar la independencia energética de los territorios y tener mayor capacidad para gestionar los mercados energéticos. Por eso, cualquier forma de almacenamiento energético debe ser estudiada, para su posterior integración, con el fin de poder hacer frente a los desafíos energéticos que se presentan en el futuro. Con este trabajo se ha demostrado que, en el ámbito de la construcción, la inercia térmica es una técnica efectiva para el almacenamiento de energía.

La segunda conclusión que se deduce es que las condiciones operacionales tradicionales de la vivienda reducen la temperatura en los espacios. En este Trabajo de Fin de Grado se ha analizado en profundidad las ventajas de la ventilación nocturna en una vivienda que cuenta con un patio. El hecho de abrir las ventanas en la noche no solo permite un mejor descanso a los ocupantes de la vivienda, si no que, en conjunto con la inercia térmica, puede reducir hasta en 6 °C la temperatura de la estancia a acondicionar. Al conseguir esta reducción, se alcanzan condiciones próximas a las de confort y se elimina parcial o completamente el uso de equipos de aire acondicionado y el consumo energético asociado a estos. Además, se ha mencionado que, al mantener una habitación a oscuras utilizando distintas protecciones solares como pueden ser contraventanas, la diferencia entre temperaturas máximas y mínimas diarias ronda el medio grado Celsius de diferencia. Un magnífico ejemplo es la estancia calificada como “oficina” de esta vivienda en estudio. Esta última condición se debe aplicar durante las horas de luz solar, procurando dejar en penumbra las habitaciones que no suelen usarse durante el día, como los dormitorios. Se recuerda que las condiciones operacionales de una casa son las de un hogar, es decir, deben integrarse de manera orgánica y singular para cada unidad familiar que las habite. Por ejemplo, no se puede mantener una oscuridad permanentemente puesto que es necesario ver, pero si que se comprueba que, aunque el uso sea más frecuente como ocurría en la habitación análoga a la oficina “habitación planta baja”, se puede mantener a raya la diferencia entre máximas y mínimas implementando los elementos de control solar.

En cuanto a los elementos arquitectónicos vernáculos, se confirma de manera clara que el patio es un oasis climático, puesto que las temperaturas recogidas durante la campaña de monitorización en esta zona de la casa están entre los 25 y los 30 °C durante el mes de julio y agosto. Esta construcción permite que mientras en el exterior se alcanzan temperaturas de 40 °C, existe una diferencia de alrededor de 10 °C en el interior de la vivienda con un coste de operación asociado nulo, tanto energéticamente como económicamente. Sin embargo, el tan ansiado confort térmico solo se disfruta en la planta baja, puesto que durante la campaña de monitorización

se recogen también elevadas temperaturas que oscilan enormemente durante la jornada para los sensores situados afuera de la galería de la segunda planta (sensor 6). Además, se estudia cuál es el comportamiento del flujo de aire en el patio buscando poder justificar las temperaturas y se obtiene que es precisamente el vórtice originado alrededor de la cubierta, el que impide el paso de aire de la calle al patio, haciendo que el aire de los pisos más cercanos al suelo nunca se caliente.

En términos de ventilación, se ha demostrado que, a mayor superficie de contacto del aire con las paredes, para un mismo caudal de aire, la posibilidad de alcanzar temperaturas más bajas gracias a la ventilación nocturna se reduce. Por lo tanto, la ventilación nocturna tiene un gran potencial de mejora en su fase de diseño, ya que la toma de decisiones en esta fase induce a reducciones importantes de la temperatura de las estancias y por lo tanto a reducciones de la demanda de energía del edificio.

Otra de las conclusiones que se extraen es que el uso de la arquitectura vernácula para la reducción de la demanda de energía de los edificios está justificado y es eficaz. Sin ánimo de caer en la redundancia, se ha demostrado que el uso de los patios y de los elementos constructivos tradicionales como es el tapial, reducen las temperaturas de las estancias y, por lo tanto, la demanda energética de los edificios y sirven como elementos de almacenamiento energético. Si bien estos elementos constructivos, son grandes agentes en esta reducción de la demanda, las condiciones operacionales tradicionales son de uso obligado para que los elementos constructivos reporten un balance positivo. En otras palabras, la ventilación debe hacerse por la noche y la penumbra debe mantenerse durante el día, y no al contrario, con el fin de mejorar el confort térmico.

Por último, se ha de añadir que existen aspectos aún mejorables en esta arquitectura vernácula. Muchos de ellos se conciben en el presente, ya que las tecnologías de fabricación han evolucionado y permiten productos manufacturados con mejores características y acabados. Algunos de esos ejemplos sería la mejora de la carpintería de los huecos, instalando carpinterías metálicas con rotura de puente térmico o un mejor aislamiento de la cubierta. Este último aspecto se ha puesto de manifiesto como una desventaja cuando se han analizado los experimentos realizados en estancias de la planta alta frente a los de la planta baja. En resumen, la rehabilitación es otra de las técnicas que deben utilizarse para poder alcanzar los objetivos de reducción de la demanda de energía, pero siempre, respetando e integrando la arquitectura vernácula.

En este trabajo, se demuestra que los países del sur de Europa, y en concreto, la región de Andalucía, son excelentes candidatos para la aplicación del programa *New European Bauhaus* ya que existe un patrimonio inmaterial y material que perfectamente cumple con los principios de este programa, que son “*beautiful, sustainable, together*”. Toda esta sabiduría se pone al servicio del conjunto de países miembros de la UE para afrontar los retos que depara el futuro.

REFERENCIAS

- AEMET. (agosto 2023). *Avance Climatológico Mensual Mes de Agosto*. Sevilla. Obtenido de https://www.aemet.es/documentos/es/serviciosclimaticos/vigilancia_clima/resumenes_climat/ccaa/andalucia-ceuta-melilla/avance-climat_acm_ago_2023.pdf
- AEMET. (julio 2023). *Avance Climatológico Mensual mes de julio*. Sevilla. Obtenido de https://www.aemet.es/documentos/es/serviciosclimaticos/vigilancia_clima/resumenes_climat/ccaa/andalucia-ceuta-melilla/avance_climat_acm_jul_2023.pdf
- Amir Tabadkani, S. A. (2022). Courtyard design impact on indoor thermal comfort and utility costs for residential households: Comparative analysis and deep-learning predictive model. *Keai Publishing*, 963-980.
- Anglada, R. (2007). La arquitectura doméstica tradicional en Carmona. *Arquitectura vernácula en el mundo ibérico: actas del congreso internacional sobre arquitectura vernácula* (págs. 340-346). Sevilla: Universidad Pablo de Olavide.
- Excelentísimo Ayuntamiento de Écija. (23 de Julio de 2009). Plan General de Ordenación Urbana. *Memoria de Información*, 126-195. Écija, Sevilla, España.
- Feduchi, L. M. (1978). *Itinerarios de arquitectura popular española. Los pueblos blancos*. Madrid: Blume.
- Graciani, A. &. (2008). El tapial en el área sevillana. *Arqueología de la Arquitectura*, 135-158.
- IDAE. (2007). *Estrategia de ahorro y eficiencia energética en España 2004-2012. Plan de Acción*. Madrid: Ministerio de Industria, Turismo y Comercio. Recuperado el 11 de Noviembre de 2023, de https://www.idae.es/sites/default/files/documentos/publicaciones_idae/plan_de_accion_2008-2012_19-07-07_con_tablas.pdf
- IDAE. (2009). *Condiciones de aceptación a procedimientos alternativos a LIDER y CALENER*. Anexos. Madrid.
- IDAE. (2009). *Condiciones de Aceptación de Procedimientos Alternativos a LIDER y CALENER*. Madrid.
- IEA. (2023). *World Energy Outlook*.
- IPCC. (2023). *Climate Change Information for Regional Impact and for Risk Assessment*. Cambridge, United Kingdom and New York: Cambridge University Press.
- J. Canivell, R. G. (2014). Vernacular rammed earth building typologies in the ancient reign of Seville, Spain. *Vernacular Heritage and Earthen Architecture: Contributions for Sustainable Development*, 117-122.
- Mohammad Taleghani, M. T. (2012). Environmental Impact of Courtyards-A Review and Comparison of Residential Courtyard Buildings in different climates. *Journal of Green Building*, 113-136.
- UE. (25 de octubre de 2012). Directiva 2012/27/UE del Parlamento Europeo y del Consejo de la UE. Bruselas, Bélgica. Recuperado el 11 de noviembre de 2023, de <https://www.boe.es/doue/2012/315/L00001-00056.pdf>
- UNESCO. (1984). Alhambra, Albaicín y Generalife de Granada. Granada, Granada, España. Recuperado el 1 de Noviembre de 2023, de <https://whc.unesco.org/en/list/314>
- UNESCO. (1987). Catedral, Alcázar y Archivo de Indias en Sevilla. Sevilla, Sevilla, España. Recuperado el 1 de Noviembre de 2023, de <https://whc.unesco.org/en/list/383/>
- UNESCO. (2012). La fiesta de los patios de Córdoba. *Patrimonio Cultural Inmaterial de la Humanidad*. Córdoba, Córdoba, España. Recuperado el 1 de Noviembre de 2023, de <https://ich.unesco.org/es/RL/la-fiesta-de-los-patios-de-cordoba-00846>
- Unión Europea. (1 de Noviembre de 2023). *New European Bauhaus*. Obtenido de https://new-european-bauhaus.europa.eu/index_en

-
- Victoria Patricia López-Cabeza, C. R.-G.-F.-V.-L. (2022). Effect of thermal inertia and natural ventilation on user comfort in courtyards under warm summer conditions. *Elsevier. Building and Environment*.
- Wael A. Yousef Mousa, W. L. (2017). Assessment of the impact of window screens on indoor thermal comfort and energy efficiency in a naturally ventilated courtyard house. *Architectural Science Review*, 382-394.

ANEXOS

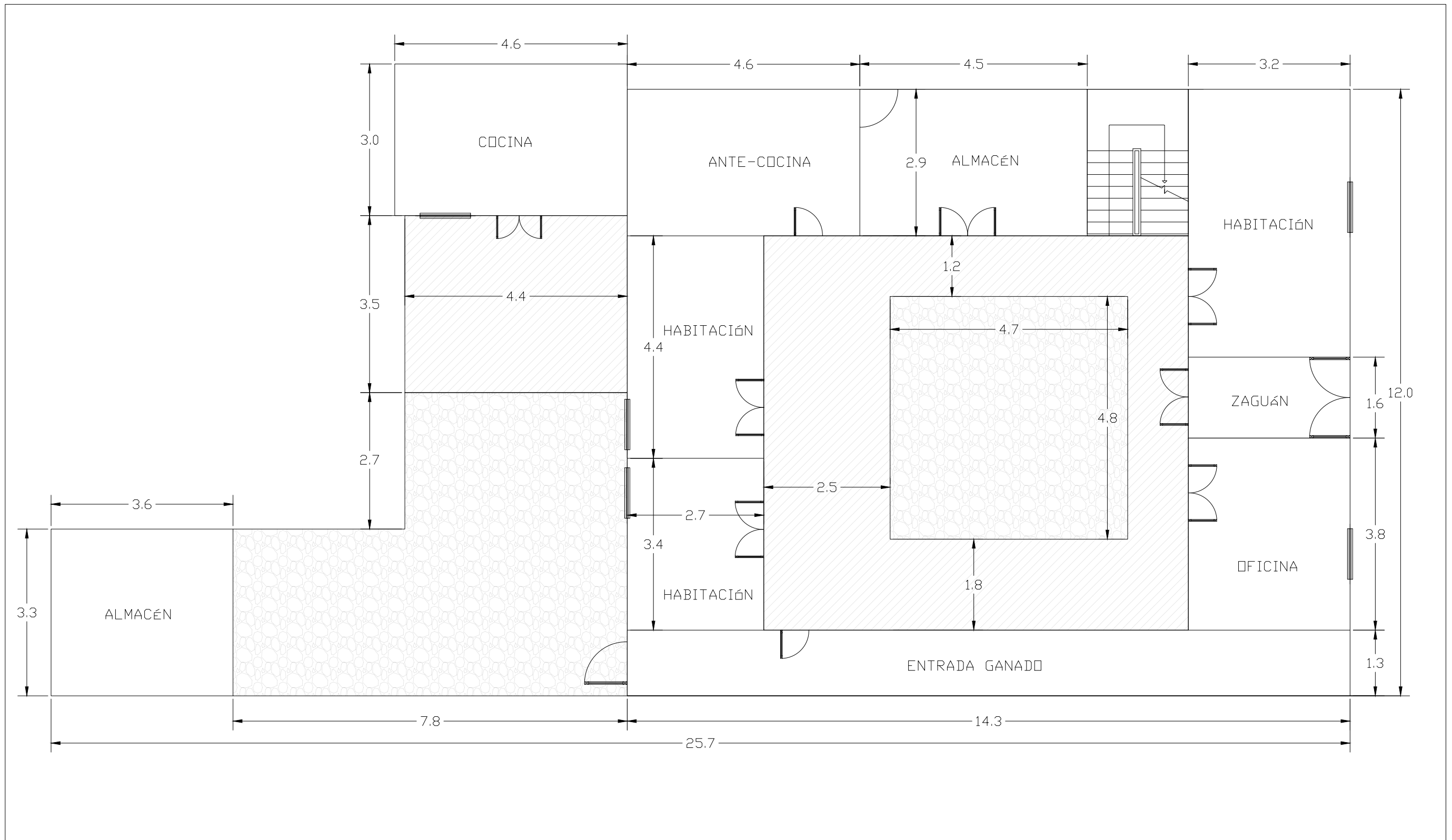
ANEXO A. PLANOS DE LA VIVIENDA





ANEXO B. ANÁLISIS CUALITATIVO ZONAS EXTRA

ANEXO C. MODELO FLUIDODINÁMICO DE LA VENTILACIÓN

ANEXO D. ENTORNO DE SIMULACIÓN

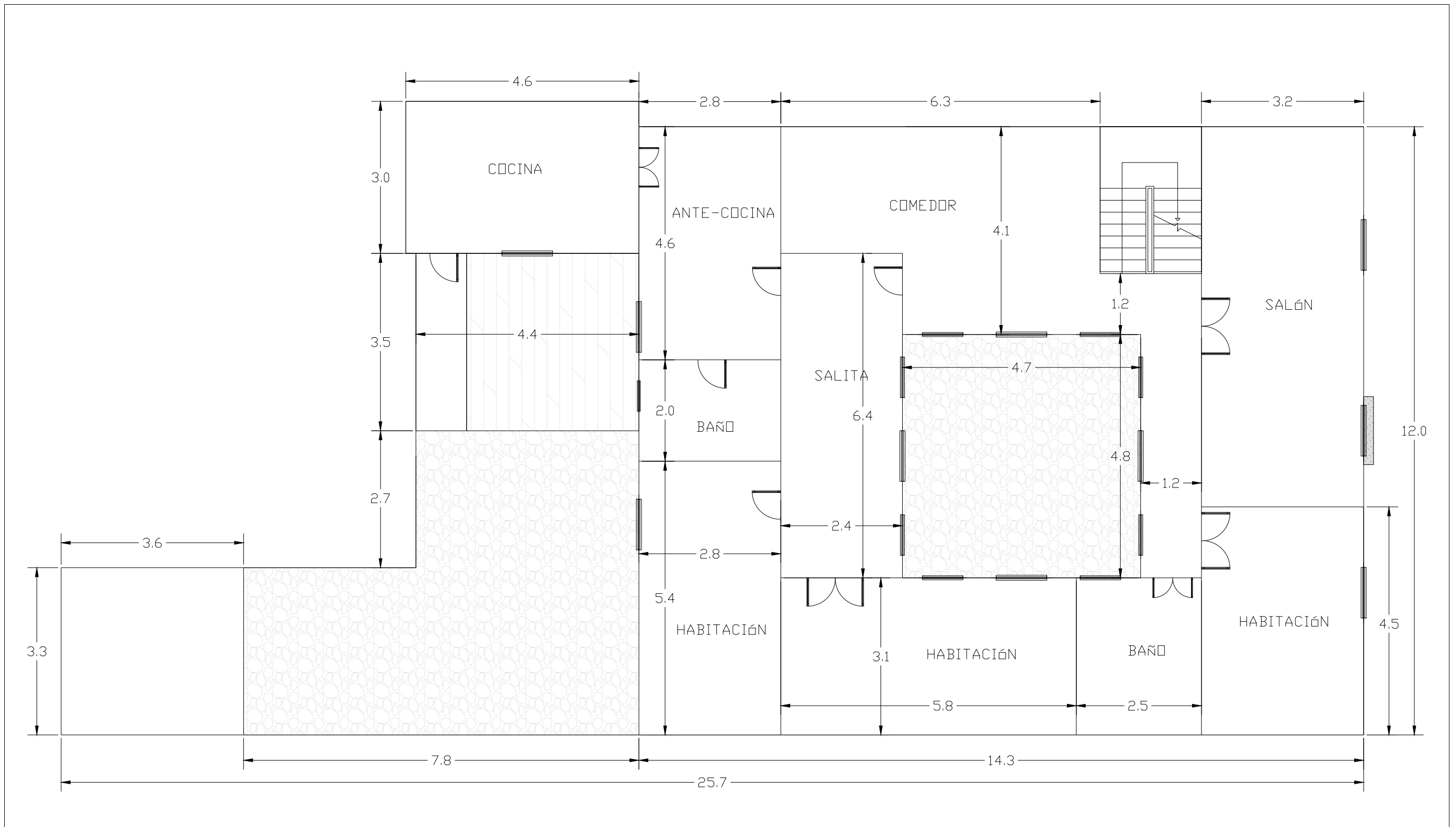
ANEXO A. PLANOS DE LA VIVIENDA



	PATIO		PORCHE/SOPORTAL
	TERRAZA		POZO

LEYENDA

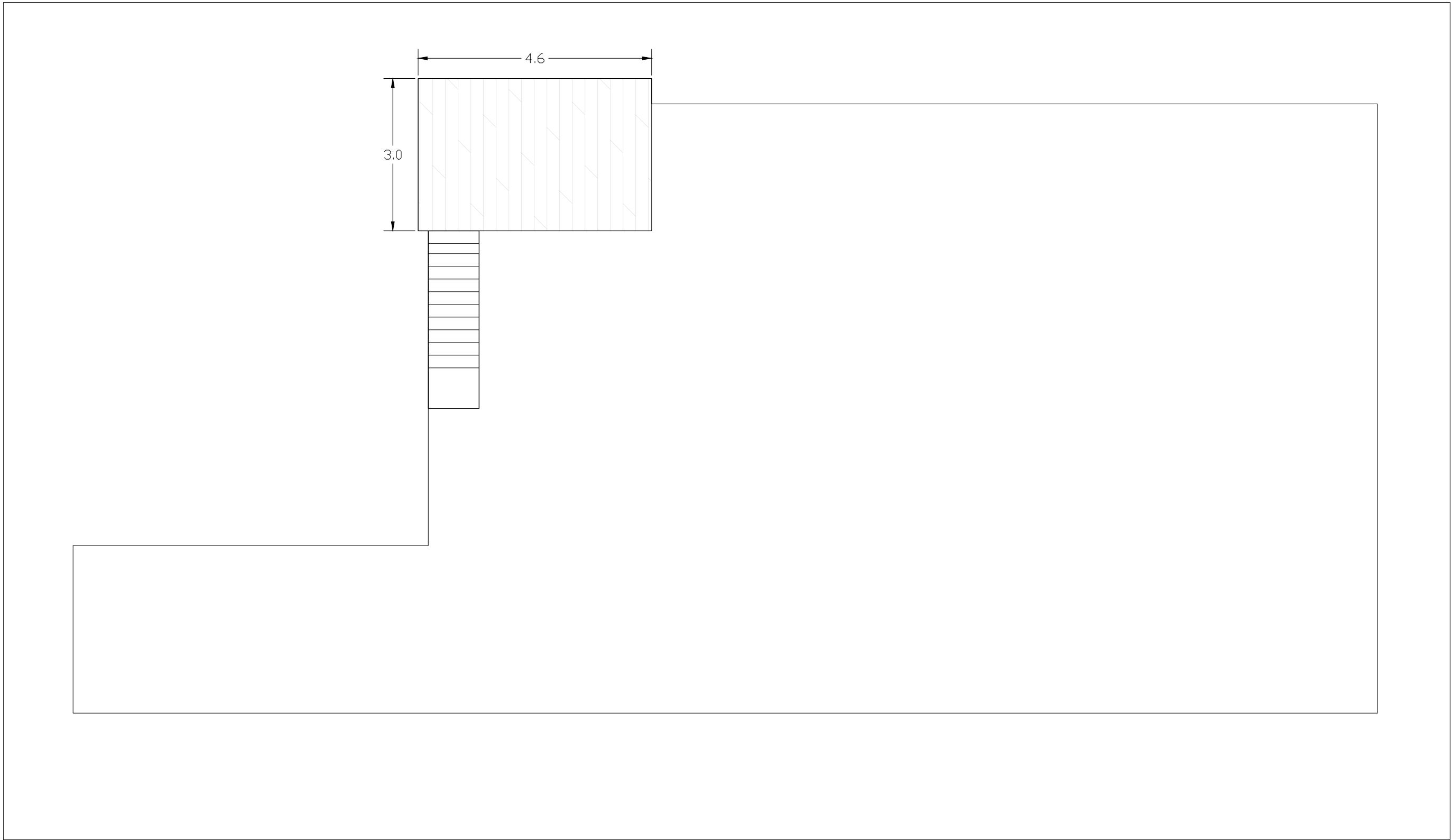
ESCALA:	HECHO POR:	FECHA:
1:2000	TCV	28/06/2023
PROYECTO:	ANCHA 15	
PLANO:	PLANTA PRIMERA	



	PATIO		PORCHE/SOPORTAL
	TERRAZA		POZO

LEYENDA

ESCALA:	HECHO POR:	FECHA:
1:2000	TCV	28/06/2023
PROYECTO:	ANCHA 15	
PLANO:	PLANTA SEGUNDA	



	PATIO		PORCHE/SOPORTAL
	TERRAZA		POZO

LEYENDA

ESCALA:	HECHO POR:	FECHA:
1:2000	TCV	28/06/2023
PROYECTO:	ANCHA 15	
PLANO:	PLANTA TERCERA	

ANEXO B. ANÁLISIS CUALITATIVO ZONAS EXTRA

A Primera planta

En este apartado se adjuntan las gráficas de las zonas que no se han presentado en la memoria de la planta primera o planta baja.

A.1 Primera planta. Zaguán (Sensor 1)

En este caso, las medidas se recogen desde el 2 de julio a las 17:20 h hasta el 1 de octubre a las 17:10h.

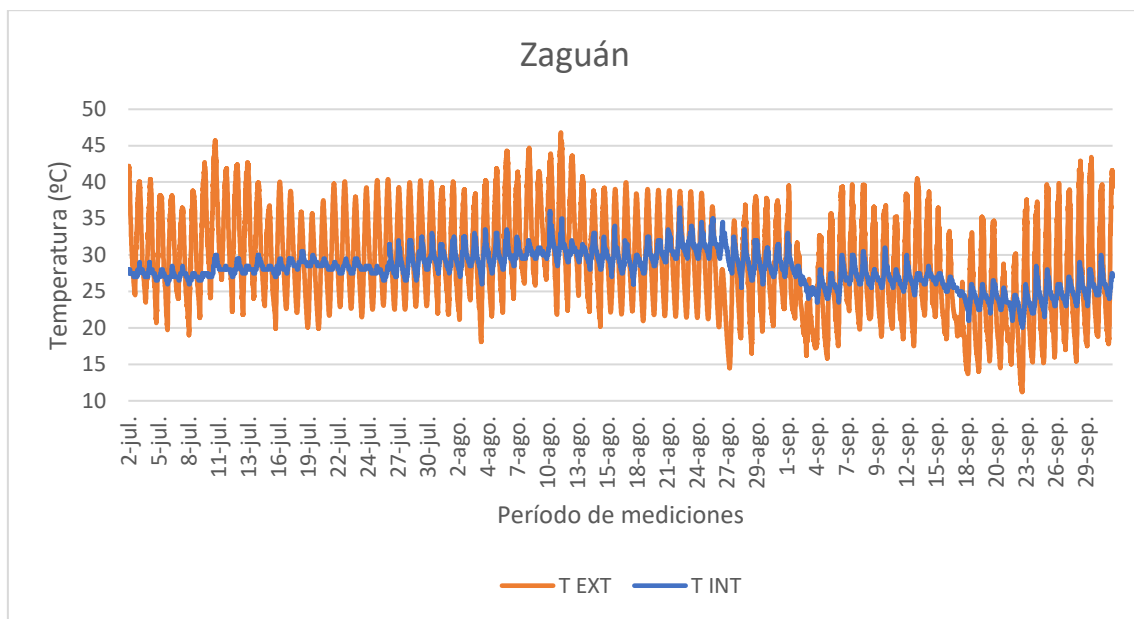


Figura 1: Temperatura interior medida en el zaguán y temperatura exterior

Durante el primer mes, la temperatura interior se ve muy poco afectada variando tan solo entre los 27 y 30 °C, debido a estar posicionado en el suelo. Una vez se cambió la ubicación a la que se indica en el *Capítulo 2. Descripción del entorno de trabajo y la experimentación*, se observa que el espacio responde de forma más dinámica a las excitaciones exteriores, sin embargo, nunca llega a acercarse a las mínimas o máximas exteriores debido a la oscuridad, los anchos muros y la continuidad con el patio. Se marca con una línea azul el momento en el que se cambia la ubicación.

A.2 Primera planta. Habitación (Sensor 5)

En este caso, las medidas se recogen desde el 26 de julio a las 20:20 h hasta el 1 de octubre a las 17:10 h.

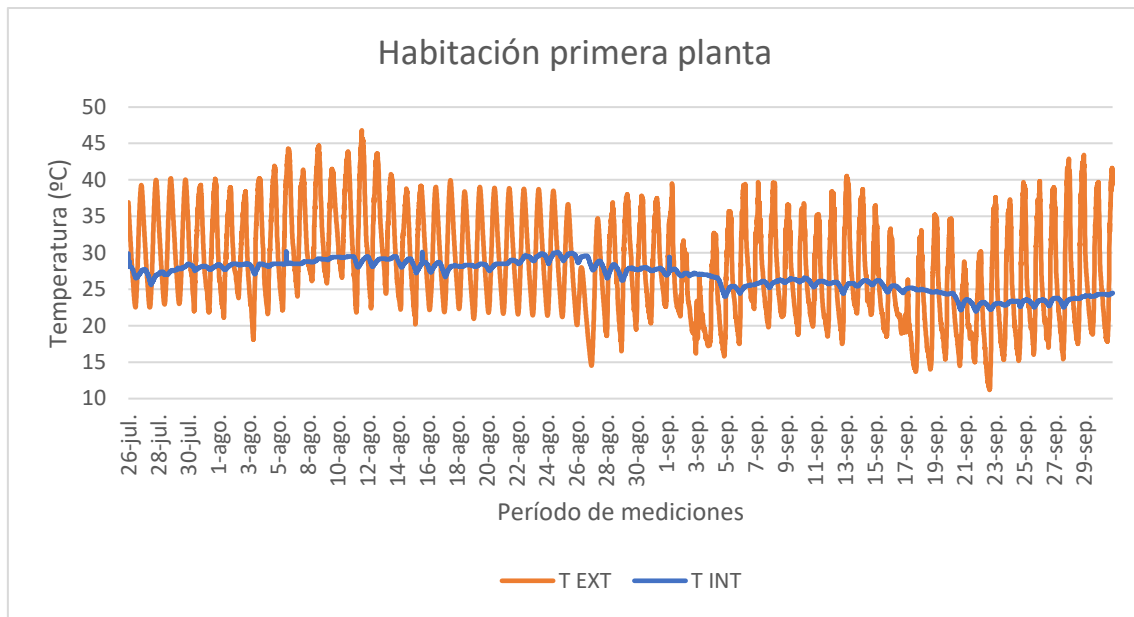


Figura 2: Temperatura interior medida en la habitación de la planta baja y temperatura exterior

La diferencia entre las máximas y las mínimas está en torno a los 2 °C, siempre siguiendo la tendencia de las temperaturas exteriores. Constructivamente, esta habitación es idéntica a la oficina, sin embargo, el rango entre máximas y mínimas es algo diferente. Se comparan más en detalle en el apartado 3.2 *Discusión de los resultados* del documento Memoria.

B Segunda planta

En este apartado se adjuntan las gráficas de las zonas que no se han presentado en la memoria de la planta segunda o planta alta.

B.1 Segunda planta. Comedor (Sensor 7)

En este caso, las medidas se recogen desde el 2 de julio a las 17:20 h hasta el 1 de octubre a las 17:10h.

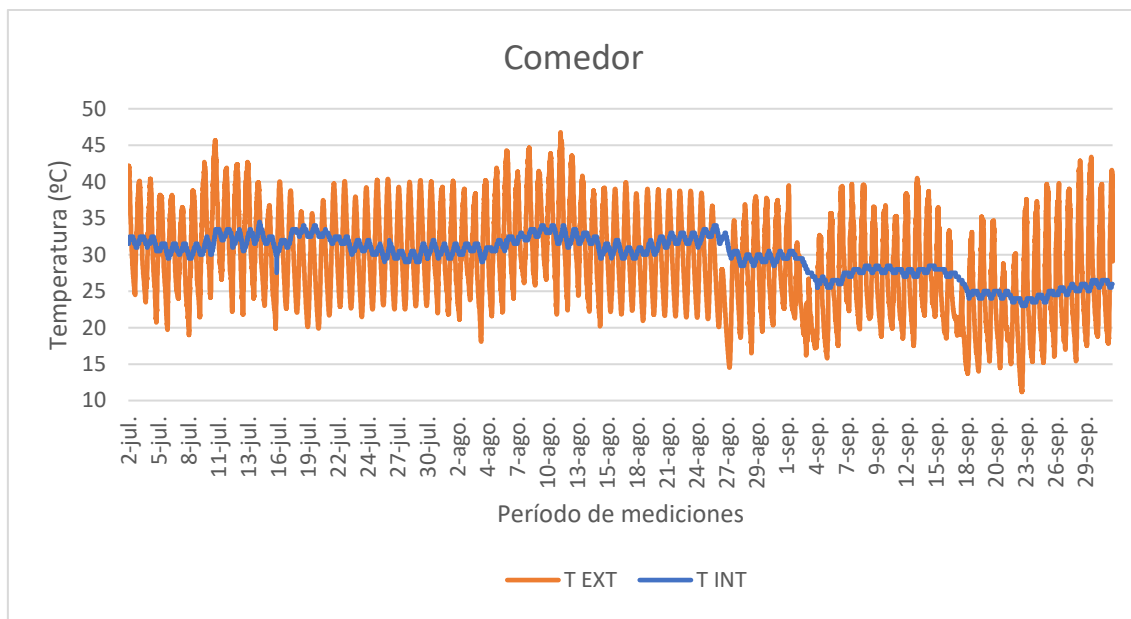


Figura 3: Temperatura interior medida en el comedor y temperatura exterior

Esta habitación experimenta unas diferencias entre temperaturas máximas y mínimas 1.5 °C de media. Lo más llamativo de esta habitación frente a las estudiadas en la primera planta se comparará con mayor detalle en 3.2 *Discusión de los resultados* del documento Memoria.

B.2 Segunda planta. Habitación (Sensor 8)

En este caso, las medidas se recogen desde el 2 de julio a las 17:20 h hasta el 1 de octubre a las 17:10h.

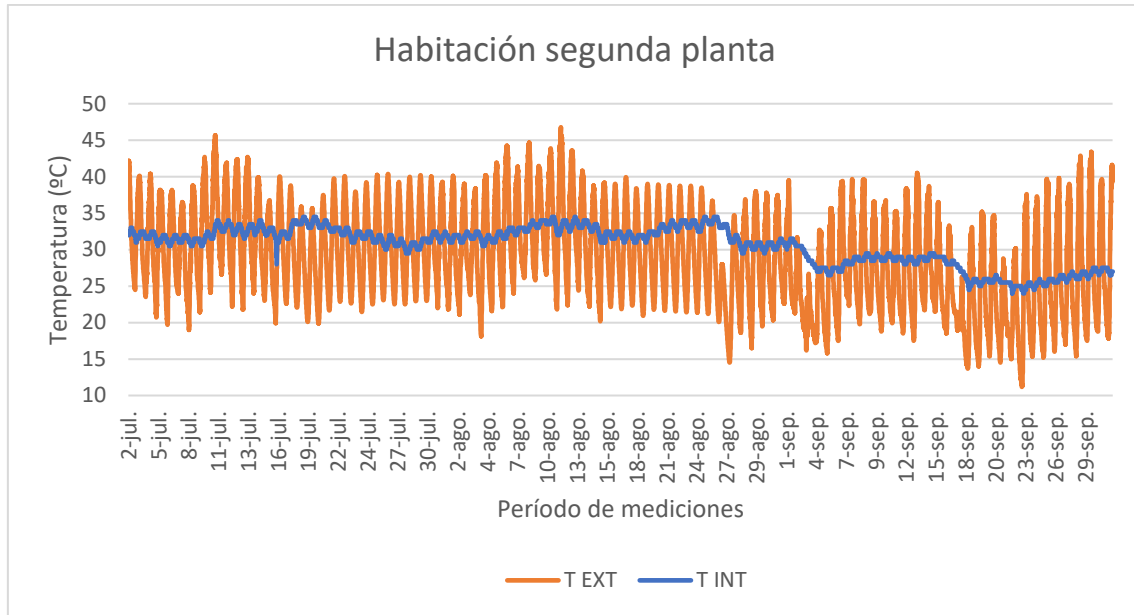


Figura 4: Temperatura interior medida en la habitación de la planta alta y temperatura exterior

Según muestra la Figura 4, las mediciones recogidas son muy parecidas a las recogidas en el caso anterior por el sensor 7, comedor, puesto que se encuentran en estancias simétricas.

B.3 Segunda planta. Salón (Sensor 9)

A continuación, se muestran todos los períodos de ventilación nocturna en el salón que no se han mostrado en el *Capítulo 3. Análisis Cualitativo* de la memoria del trabajo.

- 12 al 14 y 15 al 17 de agosto de 2023

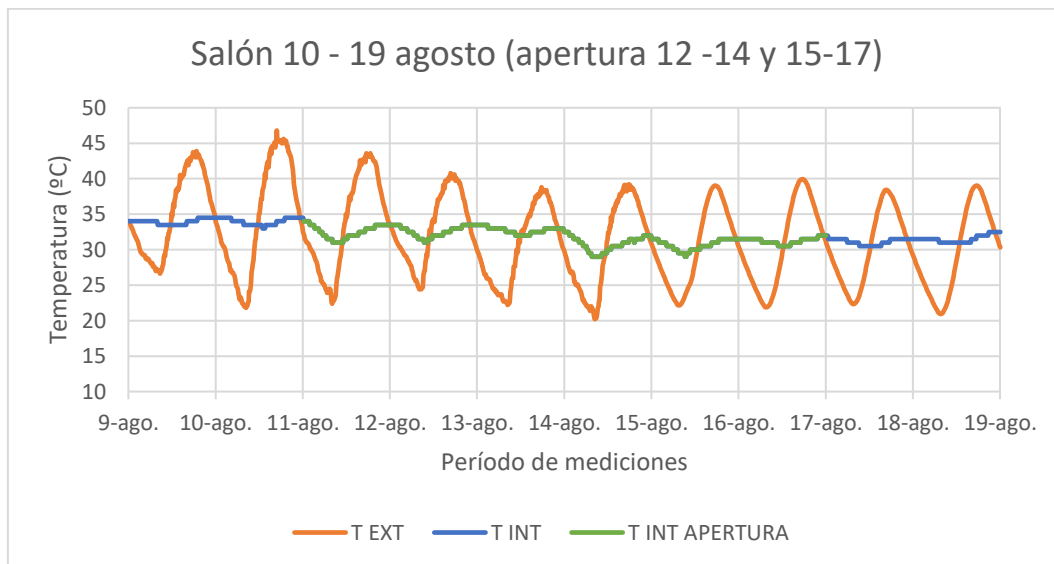


Figura 5: Período del 10 – 19 de agosto para salón

- 20 al 24 de agosto de 2023

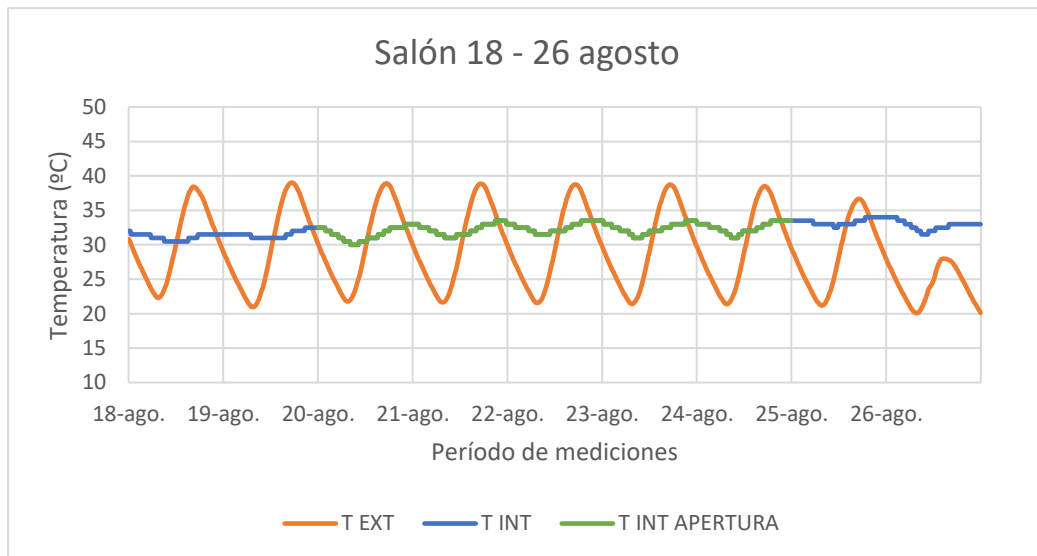


Figura 6: Período del 18 - 26 de agosto para salón

- 26 al 28 de agosto de 2023

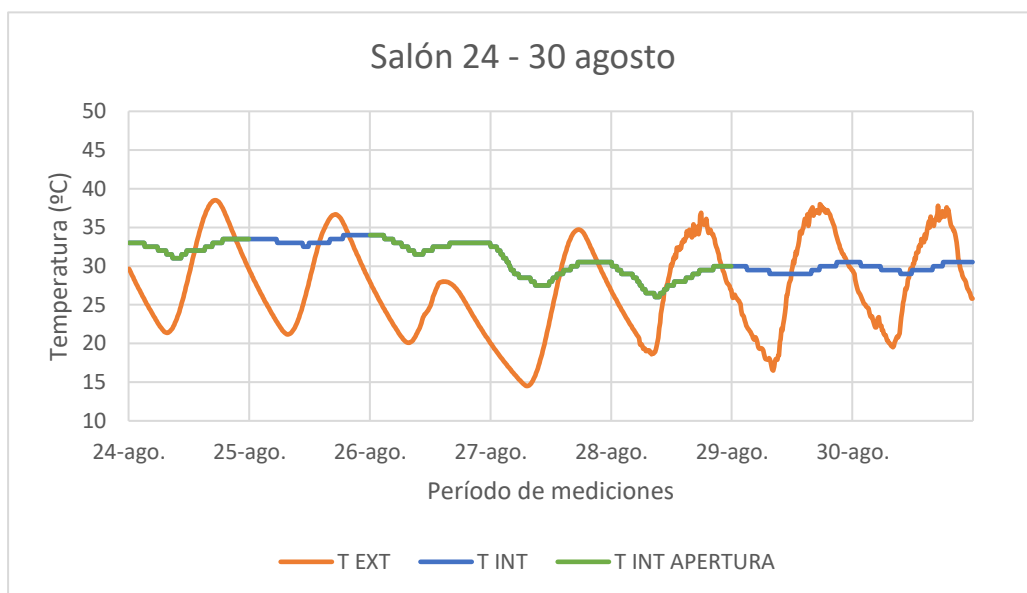


Figura 7: Período del 24 -30 de agosto para salón

B.4 Segunda planta. Habitación fachada (Sensor 10)

A continuación, se muestran todos los períodos de ventilación nocturna en el salón que no se han mostrado en el *Capítulo 3. Análisis Cualitativo de la memoria del trabajo.*

- 12 al 14 y 15 al 17 de agosto de 2023

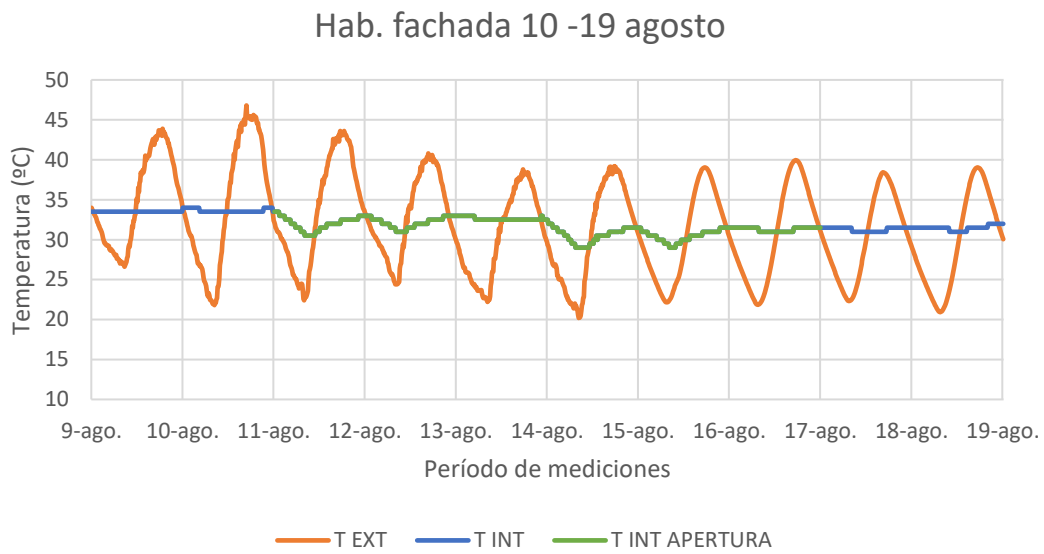


Figura 8: Período 10-19 de agosto en habitación fachada

- 20 al 24 de agosto de 2023

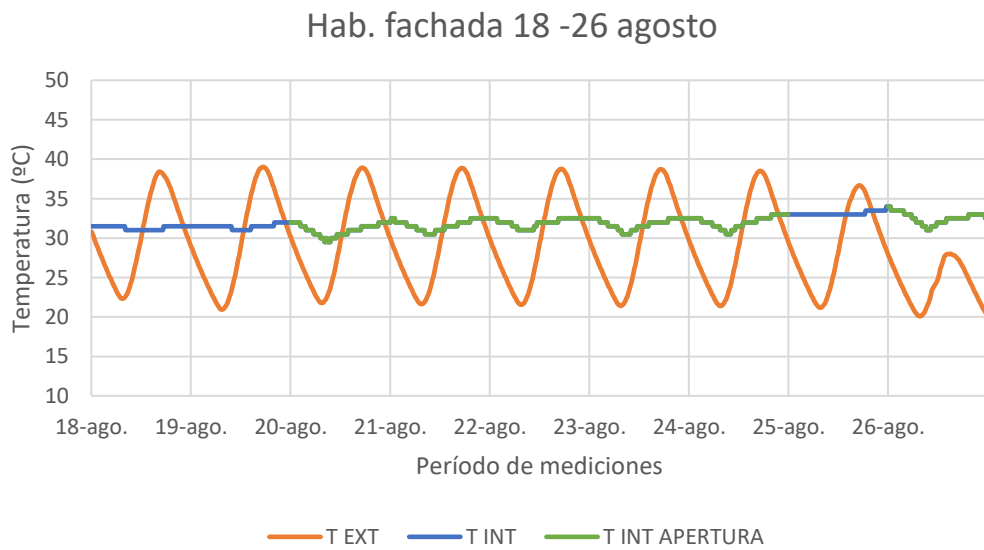


Figura 9: Período 18-26 de agosto en habitación fachada

- 26 al 28 de agosto de 2023

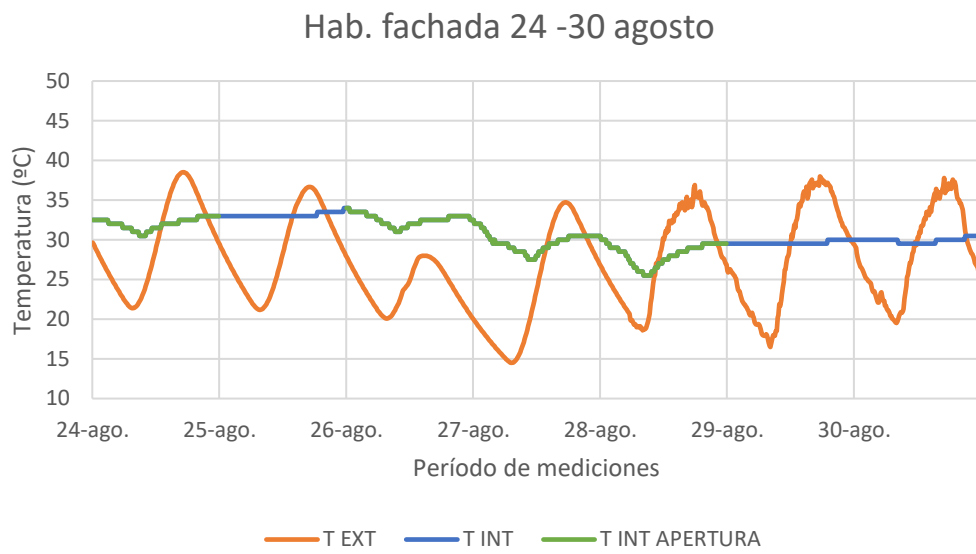


Figura 10: Período 24-30 de agosto en habitación fachada

ANEXO C. MODELO FLUIDODINÁMICO DE LA VENTILACIÓN

A Descripción del software

El software que se ha utilizado para el desarrollo de la información que en los siguientes capítulos se tratará ha sido *Ansys Fluent*, que es un programa de cálculo numérico de dinámica de fluidos, más conocido por sus siglas en inglés como *Computational Fluid Dynamics* “CFD”. Ansys Fluent crea modelos físicos avanzados que permiten analizar una gran variedad de fenómenos relacionados con fluidos. En concreto, en estas simulaciones se estudia el comportamiento turbulento del flujo. La configuración que se utiliza para este caso son las ecuaciones *Reynolds-Averaged Navier Stokes* “RANS”, en concreto el modelo de dos ecuaciones $k-\epsilon$ RNG. Se aportan estas ecuaciones para calcular diferentes magnitudes que modelan matemáticamente el comportamiento de un fluido. Sin embargo, hay que definir una serie de condiciones como la entrada y salida de aire deseada o las dimensiones y geometría de la habitación en estudio en el caso que se está tratando en este trabajo. Todo el trabajo que se ha ejecutado ha sido con modelos en dos dimensiones puesto que lo que se pretende es conocer de forma aproximada el comportamiento del fluido para poder establecer algunas hipótesis que más tarde se apoyarían sobre los resultados experimentales.

Se han llevado a cabo dos tipos de estudio, sobre el movimiento de la masa de aire alrededor de la vivienda y sobre la ventilación cruzada en la habitación de la fachada y el salón, ambos de la planta superior de la casa, donde se han ejecutado los experimentos de la ventilación nocturna que se expusieron en el *Capítulo 2. Descripción del entorno de trabajo y la experimentación* correspondiente a la memoria del trabajo

B Estudio de la masa de aire alrededor de la vivienda

El primero de los estudios analiza el movimiento de la masa de aire no solo en la casa de estudio si no también en su relación con los edificios vecinos, que indudablemente juegan un papel en el movimiento del aire alrededor de la vivienda. Es necesario destacar que aunque este mismo estudio se podría extender al conjunto urbanístico de toda la zona del centro de la ciudad de Écija donde se ubica la casa, se simplifica tan solo a la modelización del edificio que se encuentra en la zona sur-sudoeste ya que es la dirección en la que el viento sopla de manera más recurrente, como se puede observar en la Figura 1, que muestra el número de veces que se presenta cada una de las direcciones del viento según los datos recogidos por la Estación Meteorológica.



Figura 1. Dirección predominante del viento recogida por la Estación Meteorológica.

Cabe destacar que la fachada está orientada en esa misma dirección, sur-sudoeste, por lo que esta orientación beneficia sobremanera a la técnica de ventilación nocturna.

El edificio vecino que se encuentra en esta dirección se trata de una vivienda de tres pisos, a diferencia de la casa en estudio, que tan solo tiene dos pisos. Se estima una altura de la fachada de la vivienda de alrededor de 9 m, a diferencia de la fachada de la casa en estudio, que se estima en torno a los 6 m. Se puede tener una mejor idea de esta situación gracias a la Ilustración 1 obtenida de Street View de Google Earth, tomada en dirección sudoeste, donde se encuentra a la izquierda la casa de estudio y a la derecha la casa vecina.



Ilustración 2: Captura tomada de Street View de Google Earth de las viviendas

Se añade también la Ilustración 2, también obtenida de Google Earth, en la que se señala con una elipse en rojo la vivienda vecina y con una circunferencia azul la casa en estudio.



Ilustración 1: Foto aérea de Google Earth de las viviendas

Volviendo al estudio en Ansys Fluent, para llevar a cabo la modelización del espacio, se ha procedido con un corte transversal de la vivienda como se puede observar en la Ilustración 3, además de añadir la geometría de la vivienda vecina y un *downwash*, que es simplemente una geometría que se añade para que el fluido se recupere de los obstáculos que se ha encontrado a su paso y los resultados de la simulación sean fiables.

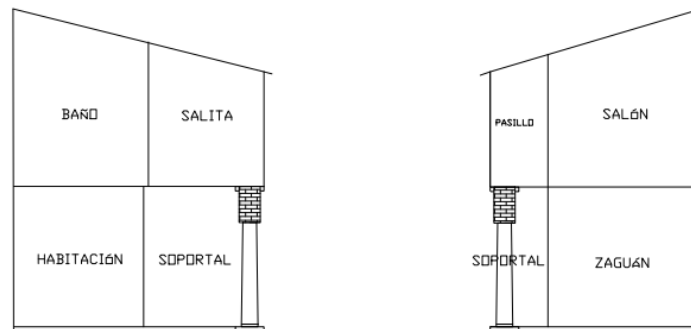


Ilustración 3: Sección transversal de la vivienda

Se estudian diferentes casos variando por una parte la geometría de la propia casa en estudio o la relación con los edificios cercanos y, por otra parte, la velocidad del viento. El objetivo final con este estudio es conocer los coeficientes de presión en cuatro puntos estratégicos de la fachada y una de las paredes que conforma el patio, es decir, las zonas de barlovento y sotavento, para ambas plantas. Los coeficientes de presión son números adimensionales que describen la presión relativa en un campo en el que se mueve un fluido. Su interés radica en el hecho de que podemos conocer de manera sencilla qué zonas del edificio están a barlovento, parte de donde viene el viento, o a sotavento, parte opuesta a aquella de donde viene el viento, y, por lo tanto, la dirección en la que se mueve el aire. En el caso de este trabajo, es primordial conocer cuál es la dirección con la que se mueve el aire puesto que la ventilación que existe entre patio y calle es la que condiciona las habitaciones en caso de que ocurra la ventilación nocturna.

La ecuación que aporta estos coeficientes de presión es la ecuación de Bernoulli que describe el comportamiento de un fluido moviéndose en una línea de corriente. Se puede transformar hasta obtener la para obtener C_p que es el llamado coeficiente de presión. Hay que destacar que ρ es la densidad del aire en kg/m^3 , V_{inf} es la velocidad en m/s y P es la diferencia de presiones en Pa.

$$C_p = \frac{P}{0.5 * \rho * V_{inf}^2}$$

Ecuación 1: Ecuación de Bernoulli para los coeficientes de presión

Para conocer la diferencia de presiones, se recurre de nuevo al programa Ansys Fluent, siempre con la simplificación en dos dimensiones de la geometría del edificio. Se realiza un mallado del dominio estableciendo un tamaño adecuado de celda para poder arrojar datos interesantes con este estudio sin que el proceso de la simulación sea demasiado largo y se obtienen los denominados *contour* de presión estática.

B.1 Flujo no se ve perturbado por edificios vecinos

Para este caso, se supone que la dirección del viento hace que este, sortee el edificio vecino y se introduzca al patio sin verse afectado por la perturbación que causaría ese obstáculo. A continuación, se procede a realizar los modelos indicando diferentes velocidades del aire, que corresponden por una parte a las velocidades medias estadísticas de la estación meteorológica SIAR de Écija en el mes de agosto de 2023 durante el día y la noche, cuyas velocidades son 1,12 m/s y 1,04 m/s respectivamente. Por otra parte, se analiza también un caso más extremo con una velocidad de 4 m/s , para poder asegurar que los coeficientes de presiones son independientes de la velocidad, debido a que al ser tan similares las velocidades de día y de noche, si hubiese algún problema, no se iba a poder localizar fácilmente con estas casuísticas.

- Velocidad de 1,12 m/s

En la Figura 2 se pueden observar las leyes del fluido, es decir la traza hipotética que va dibujando el aire cuando se mueve, en colores que van desde el rojo, 2,5 kg/s, hasta el azul, 0 kg/s lo que significa que el fluido está parado. El primer vórtice en color azul más oscuro se da en la calle Ancha y más tarde lo que se aprecia es una sola recirculación de aire en el patio de la vivienda, en un color celeste.

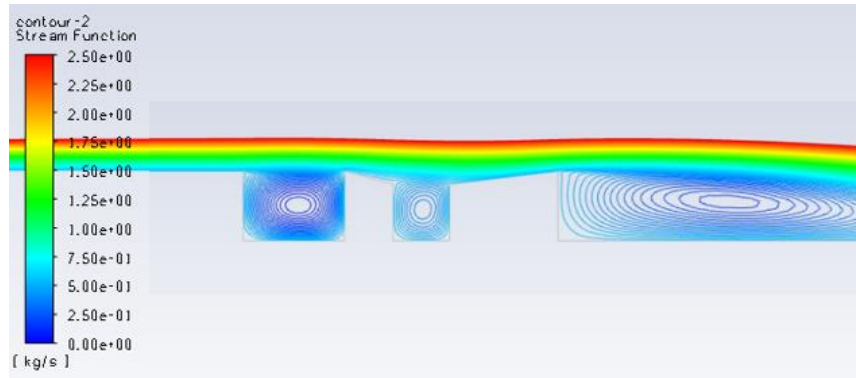


Figura 2: Leyes del fluido sin perturbación de día

Al ser este tono celeste, significa que la velocidad del aire es mayor en el patio, con una geometría más pequeña, que en la calle, lo que puede ser un indicio de mayor confort térmico en el patio, respecto al disconfort térmico en plena calle.

El *contour* de la presión estática se puede consultar en la donde la presión más baja se observa en la calle y en el *downwash*.

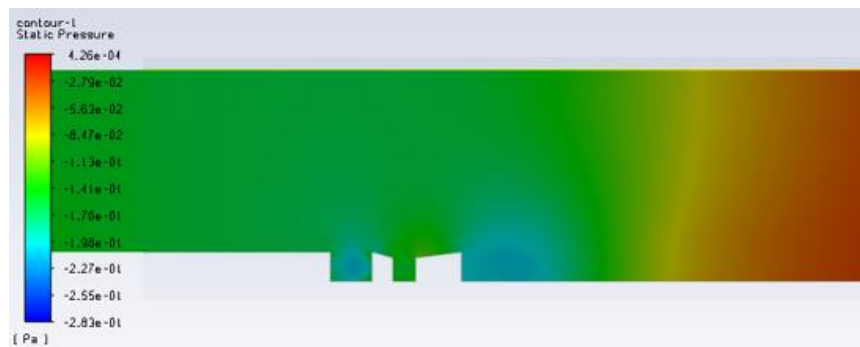


Figura 3: Contour de presión estática sin perturbación de día

Los coeficientes de presión en este caso son los que se pueden observar en la Figura 4 y que reflejan que la diferencia además de estar entre el sotavento y el barlovento también está entre las plantas alta y baja de la vivienda. Según este estudio y para este caso, la parte a barlovento se sitúa en el interior del patio, que es donde los coeficientes son mayores, y por lo tanto el flujo de aire circula desde el interior del patio hacia la calle. Se comprobará si ocurre lo mismo en los siguientes casos.

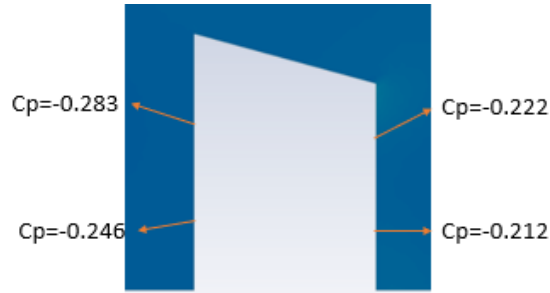


Figura 4: Coeficientes de presión sin perturbación de día

- Velocidad de 1,04 m/s

En general, para el caso nocturno, se pueden observar unas circunstancias muy parecidas al caso diurno, ya que la velocidad no cambia sobremanera. A continuación, se presentan las leyes del fluido en la Figura 5.

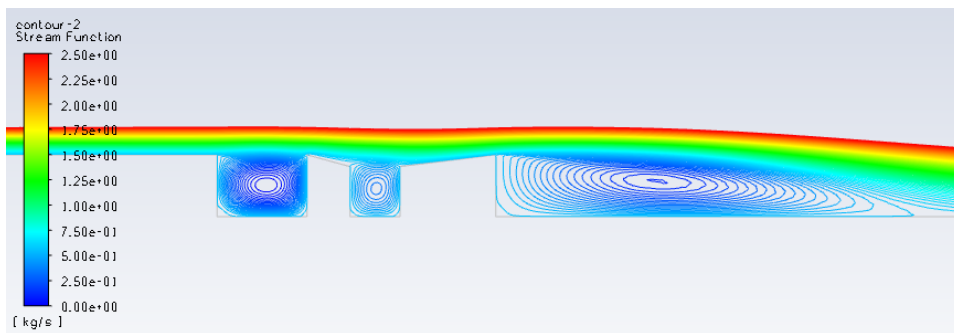


Figura 5: Leyes del fluido sin perturbación de noche

También se presenta el caso para el contour en la Figura 6.

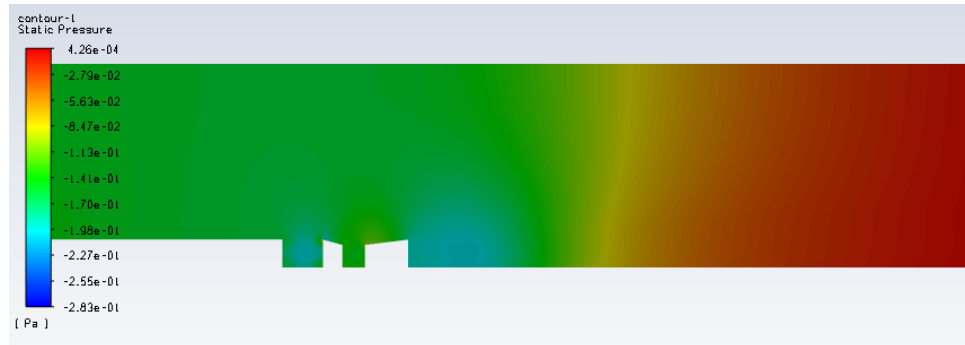


Figura 6: Contour de presión estática sin perturbación de noche

Los respectivos coeficientes de presión se pueden consultar en la Figura 7, que son parecidos en a los presentados para el caso diurno, pero lo más importante es que reflejan también que el aire viaja desde el patio hacia la calle.



Figura 7: Coeficientes de presión sin perturbación de noche

- Velocidad de 4 m/s

Se recurre a esta velocidad para poder tener certeza de que los estudios se están haciendo de manera correcta y que efectivamente, los coeficientes de presión no cambian dependiendo de la velocidad del fluido, ya que, entre la noche y el día, el valor estadístico medio de la velocidad no es muy diferente. En la

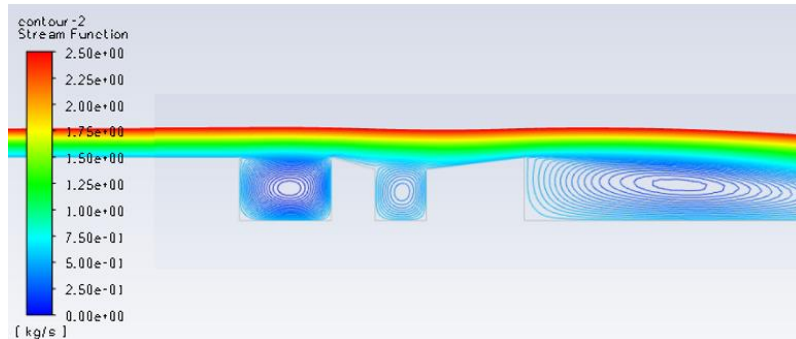


Figura 8: Leyes del fluido sin perturbación a velocidad muy alta

se muestran las leyes del fluido para este caso.

También se estudia la presión estática en la Figura 9 para poder finalmente establecer cuáles son los coeficientes de presión.

Los coeficientes de presión son para este caso los que se muestran en la Figura 10.

Por último, se comparan los coeficientes de presión en las diferentes zonas en la Tabla 1.

	1,12 m/s	1,04 m/s	4 m/s
Barlovento superior	-0,222	-0,222	-0,222
Barlovento inferior	-0,212	-0,212	-0,212
Sotavento superior	-0,283	-0,282	-0,283
Sotavento inferior	-0,246	-0,245	-0,246

Tabla 1: Comparación de coeficientes de presión según la velocidad, caso sin perturbación. Todos los coeficientes que se presentan son iguales o muy parecidos, variando tan solo en una milésima que deriva del arrastre de decimales en el cálculo. Finalmente, se puede asegurar cuáles son

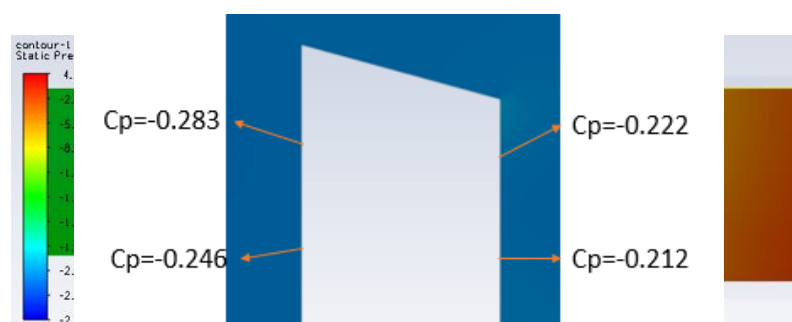


Figura 10: Coeficientes de presión sin perturbación a velocidad muy alta

las zonas a barlovento y cuáles las que están a sotavento, por lo tanto, la dirección en la que circula el aire al entrar a la vivienda.

B.2 Aire se ve perturbado por edificios vecinos

En este caso, se supone que delante de la casa existe un edificio de tres plantas con el que el viento se encuentra a su paso y no sortea. Al ser de tres plantas, se supone de una altura de 9 m frente a la casa

en estudio que se supone alrededor de los 6 m. Causa de este obstáculo, existen perturbaciones en el movimiento del aire que se estudian como en el apartado anterior para las mismas tres velocidades.

- Velocidad 1,12 m/s

El aire en su recorrido se encuentra con el edificio como obstáculo y se forma una muy pequeña recirculación al impactar con el edificio vecino como se puede observar en la Figura 11.

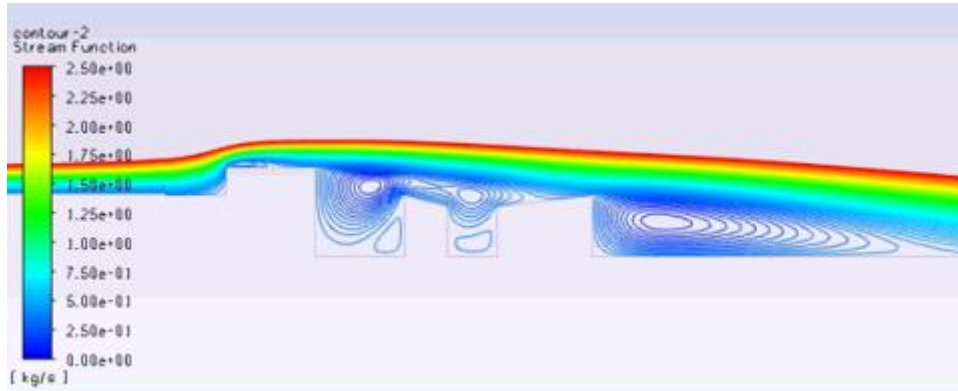


Figura 11: Leyes del fluido con perturbación con velocidad de día

Más tarde se observa la recirculación de aire en la calle, cuyo vórtice ya no se produce en el centro de la calle, si no que está un poco más arriba y hacia la izquierda, cercano a la zona de impacto con la casa. La segunda y tercera recirculación se producen en el patio después del encuentro con el siguiente obstáculo que es la fachada de la casa. Sin embargo, es la que se produce en la parte alta del patio la que altera las condiciones de este, pues no permite el paso de aire caliente procedente de la calle y protege a la planta baja donde se da una muy pequeña recirculación insignificante. También se estudia el *contour* de presión estática que muestra, en la Figura 12, como la presión cambia de manera sustancial al encontrarse con el obstáculo del edificio de 9 m y ya no se observa que las presiones más altas estén ni en la calle ni en el patio de la vivienda, si no al encontrarse con el obstáculo.

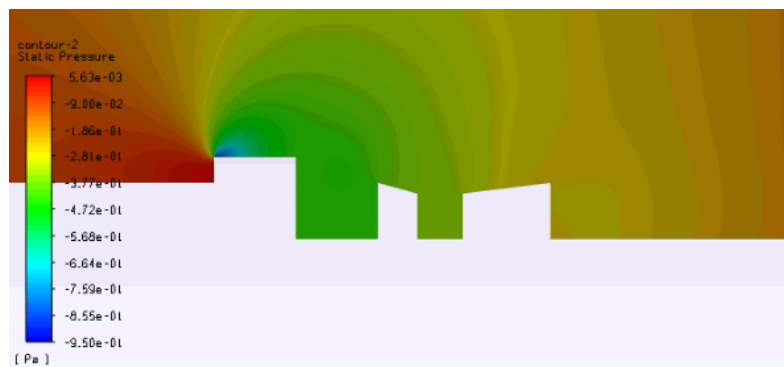


Figura 12: Contour de presión estática con perturbación de día

Al haber cambiado el patrón de la presión estática, se espera que los coeficientes de presión cambien para esta configuración y se muestran en la Figura 13.

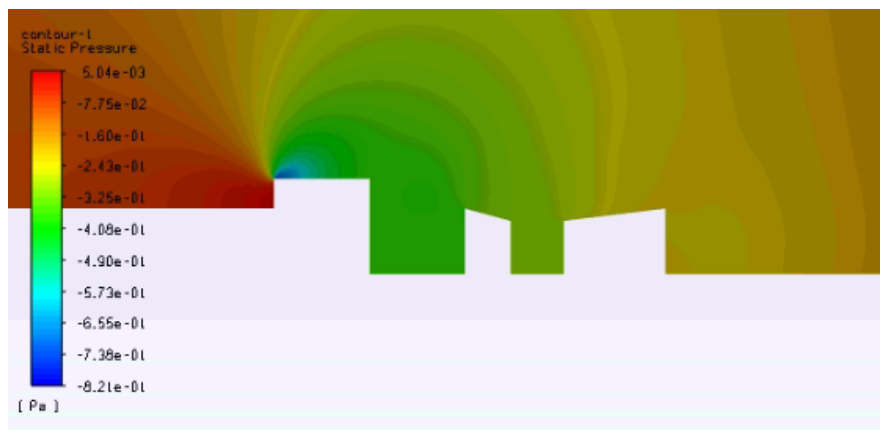


Figura 13: Coeficientes de presión con perturbación de día

- Velocidad 1,04 m/s
Aunque por la leve diferencia que existe entre estas dos velocidades, se suponen fenómenos parecidos, se realiza también para este caso el estudio de las leyes del fluido que se puede ver en la Figura 14.

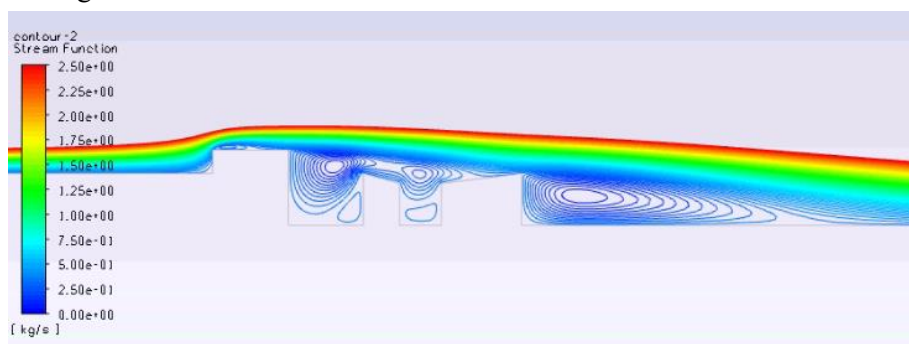


Figura 14: Leyes del fluido con perturbación de noche

De igual modo, se realiza el estudio de la presión estática mostrado en la Figura 15.

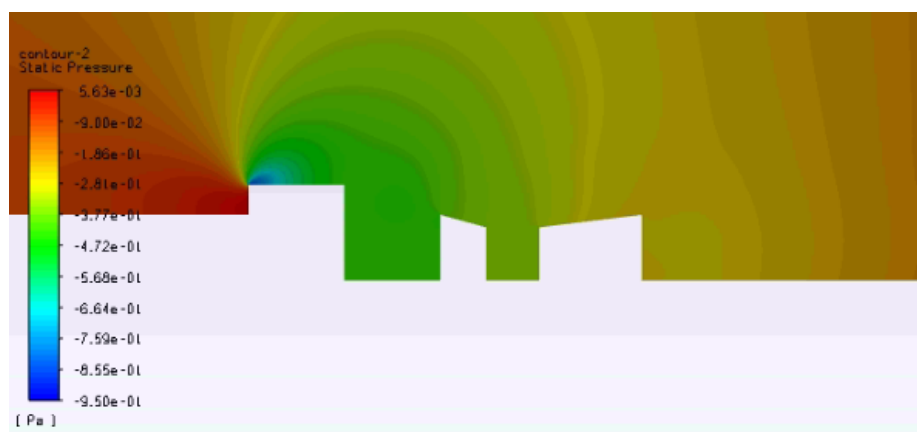


Figura 15: Contour de la presión estática con perturbación de noche

Ambos *contour* son muy parecidos y más tarde se compararán los coeficientes de presión de ambas opciones. Los coeficientes de la noche se presentan en la Figura 16.

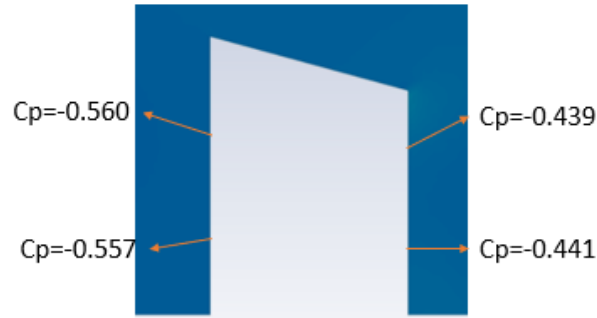


Figura 16: Coeficientes de presión con perturbación de noche

- Velocidad 4 m/s

Se puede reconocer en la Figura 17 un mismo patrón de flujo que para las anteriores velocidades, pero teniendo en cuenta que las recirculaciones llegan un poco más abajo tanto del patio como de la calle. Además, al ser la recirculación de mayor tamaño, en el exterior de este se perciben flujos más altos en azul celeste.

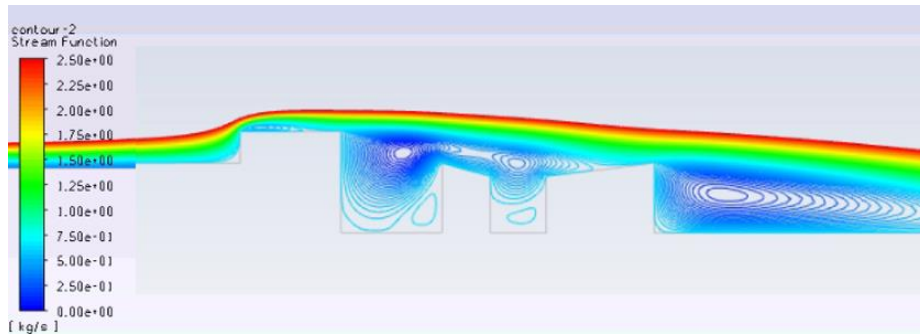


Figura 17: Leyes del fluido con perturbación a velocidad muy alta

A continuación, se muestran los resultados del *contour* de la presión estática en la Figura 18 en los que se reflejan como la presión estática se comporta de forma parecida al ser más alta en el primer impacto con el edificio vecino.



Figura 18: Contour de la presión estática con perturbación a velocidad muy alta

Los coeficientes de presión para esta velocidad son los que se muestran en la Figura 19.

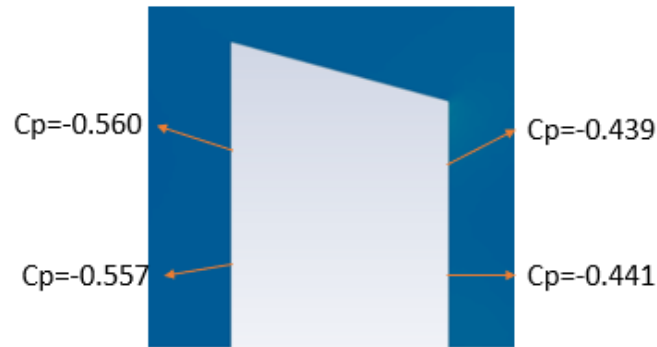


Figura 19: Coeficientes de presión con perturbación a velocidad muy alta

Por último, se muestran en la Tabla 2 los coeficientes de presión para las diferentes velocidades cuando existe un edificio que perturba el paso del aire hacia el patio de la casa en estudio.

	1,12 m/s	1,04 m/s	4 m/s
Barlovento superior	-0,436	-0,439	-0,439
Barlovento inferior	-0,438	-0,441	-0,441
Sotavento superior	-0,560	-0,560	-0,560
Sotavento inferior	-0,556	-0,557	-0,557

Tabla 2: Comparación de los coeficientes de presión según la velocidad, caso con perturbación

Los coeficientes de presión son muy parecidos entre sí, variando algunos en la milésima por arrastre de decimales en el cálculo, con lo que se puede asegurar la independencia de los coeficientes de presión de la velocidad del viento. Se comprobó también que pese a tener un elemento previo a la entrada de aire en el patio, como es el edificio vecino, las zonas de barlovento y sotavento son las mismas.

B.3 Aire se ve perturbado por edificios vecinos y modelización del claustro

Los modelos que se han utilizado anteriormente suponen una simplificación de la estructura del patio cuando en realidad este cuenta con un claustro abierto en su planta inferior, aunque está cubierto por parte de las dependencias de la parte de arriba. Para poder conocer mejor cuál es el comportamiento del aire con esta geometría, se realiza un último estudio con la velocidad media estadística de día, es decir, 1,12 m/s, con una geometría más parecida a la de la realidad. Se añade también la perturbación del edificio vecino de tres plantas antes de que el aire entre al patio. A continuación, se muestran las leyes del fluido en la Figura 20.

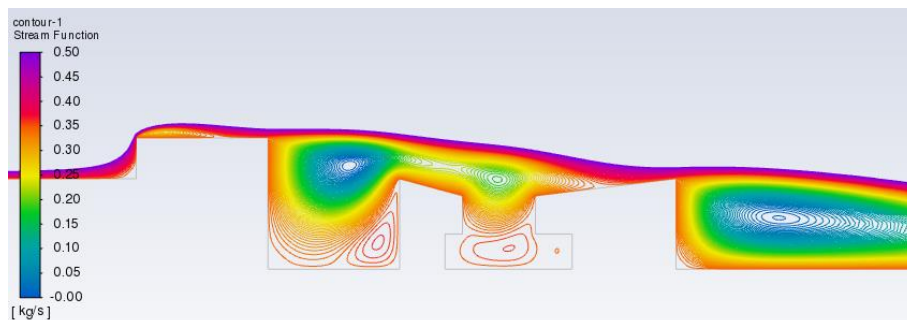


Figura 20: Leyes del fluido con perturbación y con claustro de día

Se observan comportamientos del fluido diferentes respecto a los otros casos. Por ejemplo, en la zona derecha del claustro no existe apenas recirculación del aire, ya que esta zona tiene una mayor profundidad respecto a la parte izquierda, por lo que nunca el aire procedente de la calle entrará en esta zona de ocupación. La zona izquierda, menos profunda, se ve inmersa en la recirculación de aire del propio patio que ya se mostraba con la anterior geometría, pero que de ningún modo, forma parte de ese vórtice en la parte superior del patio.

Además, en este caso que es más próximo a la realidad, se estudia también el caudal de aire que fluye hacia cada zona como se puede observar en la Figura 21.

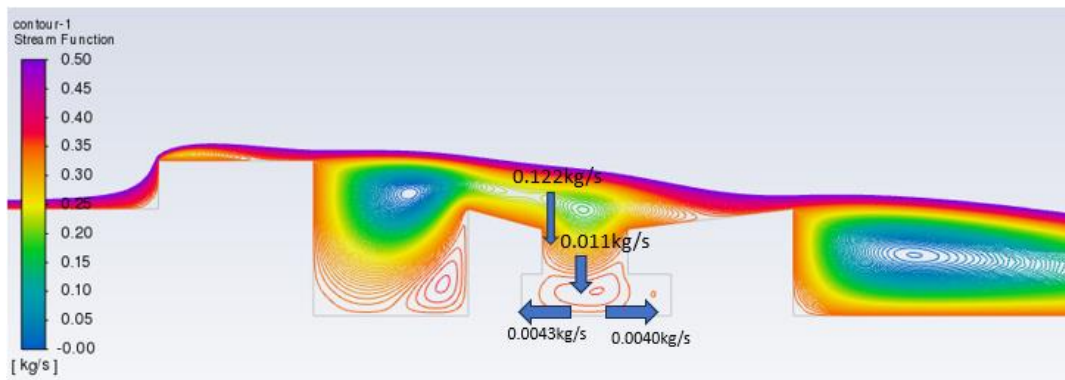


Figura 21: Caudales de aire en patio

Como en ocasiones anteriores también se hace un estudio de la presión estática, del que se ofrece el *contour* en la Figura 22.



Figura 22: Contour de la presión estática con perturbación y claustro de día

Del estudio de estas presiones estáticas derivan los coeficientes de presiones para esta geometría que se recogen en la Figura 23.

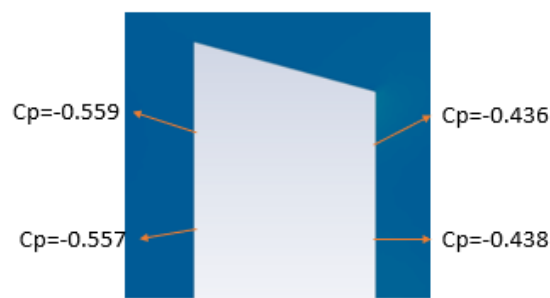


Figura 23: Coeficientes de presión con perturbación y claustro de día

En la Tabla 3, se muestran los coeficientes de presión para esta última configuración y para las anteriores configuraciones cuando la velocidad es 1,12 m/s.

	Sin perturbación	Con perturbación	Perturbación y claustro
Barlovento superior	-0,222	-0,436	-0,436
Barlovento inferior	-0,212	-0,438	-0,438
Sotavento superior	-0,283	-0,560	-0,559
Sotavento inferior	-0,246	-0,556	-0,557

Tabla 3: Coeficientes de presión con perturbación y claustro de día

El hecho de que el flujo sortee al edificio vecino es lo que más cambia los coeficientes de presión. De ahora en adelante, se trabajará siempre con el caso en el que existe el edificio que causa una perturbación en el movimiento del aire.

Por último, para conocer las diferencias de presión que existe entre la entrada y la salida de la zona superior, puesto que es donde se hacen los estudios de ventilación nocturna, se aplica la *Ecuación 2*.

$$\Delta P = \Delta C_p * 0.5 * \rho * V_{inf}^2$$

Ecuación 2: Diferencia de presión obtenida de la ecuación de Bernoulli

Para conocer el término ΔC_p , se aplica la *Ecuación 3* que no es más que la diferencia de los coeficientes de presión entre la zona de barlovento y sotavento para la zona superior.

$$\Delta C_p = C_{p_{barlovento}} - C_{p_{sotavento}}$$

Ecuación 3: Diferencia en los coeficientes de presión

Se obtiene por una parte la diferencia entre los coeficientes de presión y, por otra parte, la diferencia de presión, ambos, para la planta superior.

$$\Delta C_{p_{superior}} = 0,123$$

$$\Delta P = 0.123 * 0.5 * \rho * V_{inf}^2 = 0,301 Pa$$

C Estudio de ventilación cruzada

Una vez conocida la diferencia de presiones entre la salida y la entrada de aire en la planta superior de la casa para el caso en el que se tiene un edificio en frente de alrededor de tres plantas que perturba el movimiento del aire, se estudia también con Ansys Fluent el comportamiento del aire cuando las ventanas están abiertas. Las condiciones que se establecen son que la diferencia de presiones estática es de 0,301 Pa, que la temperatura de entrada del aire es 18 °C y que la temperatura de los muros es 25 °C.

Los estudios se hacen siempre en dos dimensiones porque el objetivo con ellos es tan solo obtener una imagen a grandes rasgos del comportamiento del aire, junto con unos órdenes de magnitud. Si se quisiese un mayor detalle, se debería establecer la cubierta y el suelo como nuevas superficies de intercambio.

En primer lugar, se estudian las líneas de corriente del fluido en su recorrido por las habitaciones de la planta superior. Como se puede observar en la Figura 24 se diferencian las líneas de corrientes que van desde el patio hasta la calle de manera directa y en los contornos de estas corrientes, empiezan a surgir vórtices.

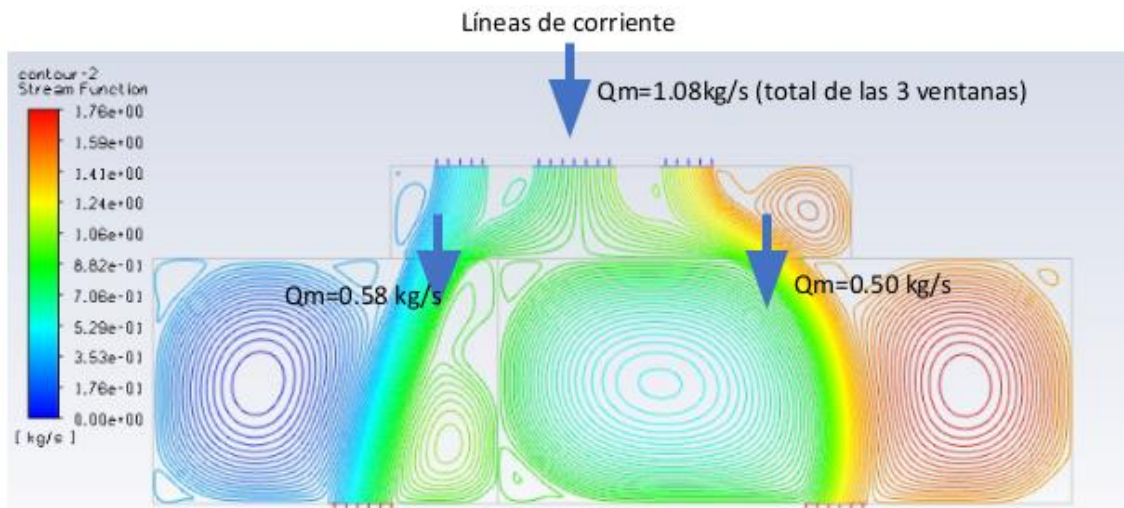


Figura 24: Líneas de corriente en ventilación cruzada

También se muestran los caudales que componen las corrientes que no entran en recirculación, es decir, las que van desde el patio hasta la calle. Sin embargo, estos caudales no representan la totalidad de aire que entra por la ventana. Para encontrar el caudal total que entra por la ventana, se recurre a la Ecuación 4, siendo m el caudal; ρ la densidad del aire a nivel del mar y 20 °C, es decir, 1,2 kg/m³; $area_{ventana}$ el área de las ventanas que dan al patio que es para las pequeñas 0,72 m² y para la grandes, 1,79 m² y, por último, v es la velocidad, que se toma igual a 2 m/s.

$$m = \rho * area_{ventana} * v$$

Ecuación 4: Caudal de aire

Se obtiene que el caudal total que entra por la venta es 7,752 kg/s, lo que supone que el caudal que se muestra en la Figura 24 solo representa el 13,93% del total de aire que entra. El resto es lo que se conoce como caudal de *bypass*, es decir, el caudal que no forma parte de la corriente principal.

Para conocer la relación entre la velocidad del viento y el caudal de aire que entra a las habitaciones, se procede con el mismo estudio, pero esta vez se simulan varios caudales para conocer la relación que existe entre estas dos magnitudes y más tarde, utilizando Excel, obteniendo la Figura 25.

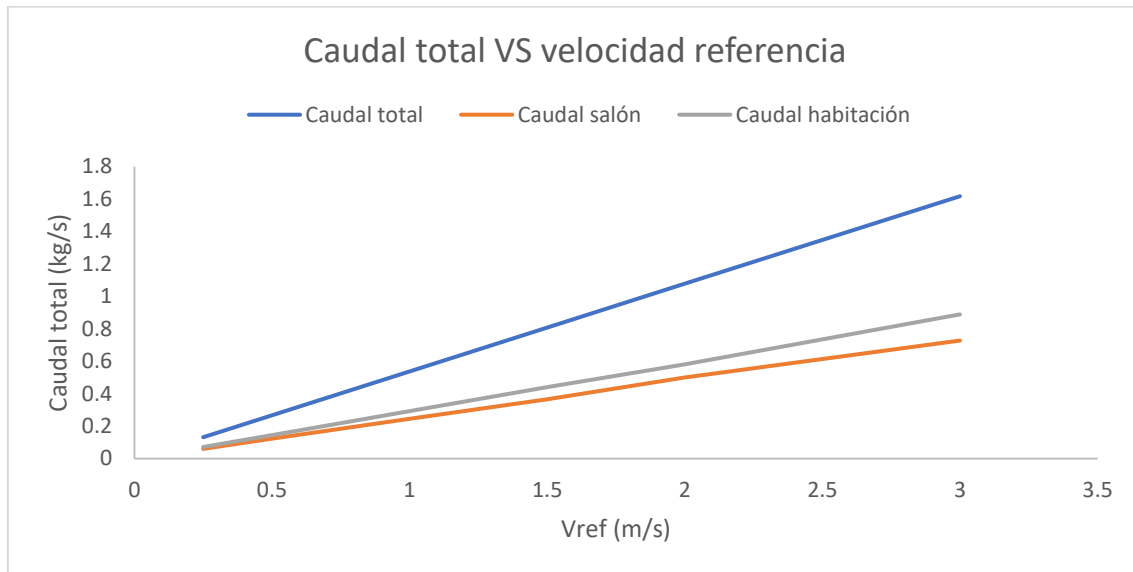


Figura 25: Relación entre velocidad del viento y caudal de aire en las estancias

Tras la obtención de la Figura 25, se indican las ecuaciones lineales que gobiernan el caudal según el comportamiento de la velocidad del viento. En la Ecuación 5 se muestra la del caudal total.

$$Q_{total} = 0,54 * V_{ref} - 0,0027$$

Ecuación 5: Relación lineal velocidad-caudal total

Gracias al conocimiento de los caudales que fluyen hacia cada una de las estancias y de la ecuación anterior se obtienen las ecuaciones para cada una de las estancias. En primer lugar, se presenta la de la habitación de la segunda planta como la Ecuación 6.

$$Q_{total} = 0,296 * V_{ref} - 0,0039$$

Ecuación 6: Relación lineal velocidad-caudal habitación

En segundo lugar, en la Ecuación 7, se muestra la relación entre la velocidad del viento y el caudal de aire que existe en el salón.

$$Q_{total} = 0,2441 * V_{ref} + 0,0013$$

Ecuación 7: Relación lineal velocidad-caudal salón

También se obtiene el *contour* de la velocidad, que en el estudio anterior no se había utilizado, para mostrar la velocidad. Como se puede observar en la Figura 26, en la corriente principal entre las ventanas, es el punto con la velocidad más alta, mientras que cerca de las paredes, la velocidad es del orden de diez veces menor.

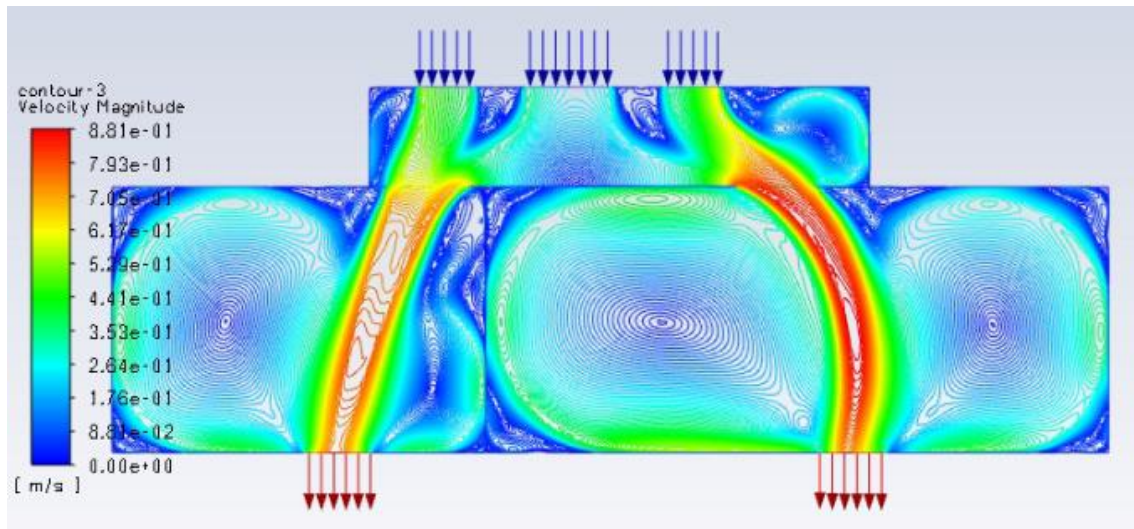


Figura 26: *Contour* magnitud de la velocidad en ventilación cruzada

Por una parte, se representa el *contour* de la presión estática en la Figura 27 en el que se muestran los valores mayores en la zona de la galería por donde entra el aire y las zonas de mayor depresión en el salón, en azul oscuro, que son las superficies y zonas en el que la vena de aire principal tiene menos contacto.

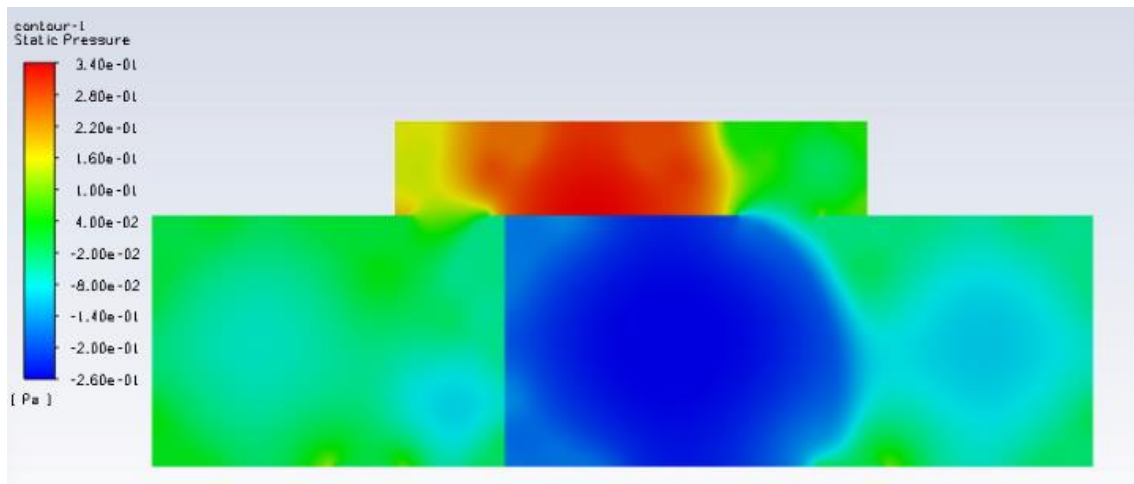


Figura 27: *Contour* de la presión estática en ventilación cruzada

En la Figura 28 se muestra el *contour* para la presión total y se pone de manifiesto que las zonas de sobrepresión son también aquellas por la que pasa la corriente principal.

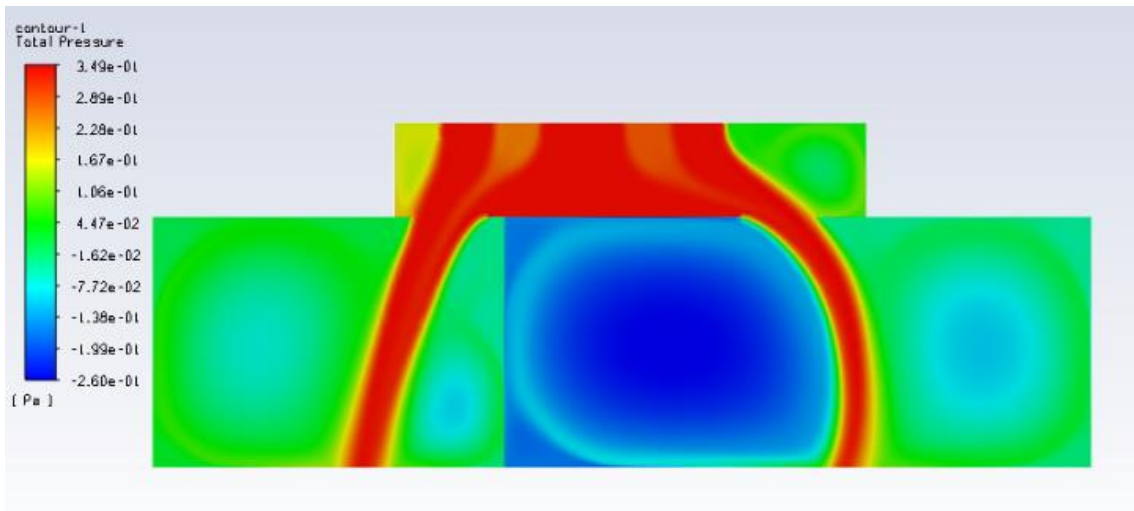


Figura 28: Contour de la presión total en ventilación cruzada

En la Figura 29 se muestra el contour de la temperatura, además de indicarse las temperaturas de entrada y salida del aire que corre desde el patio hasta la calle. Se puede observar como el aire a su paso por la habitación se va calentando, después de entrar en contacto con las superficies e intercambiar calor con ellas, por lo que alivia la carga térmica del local.

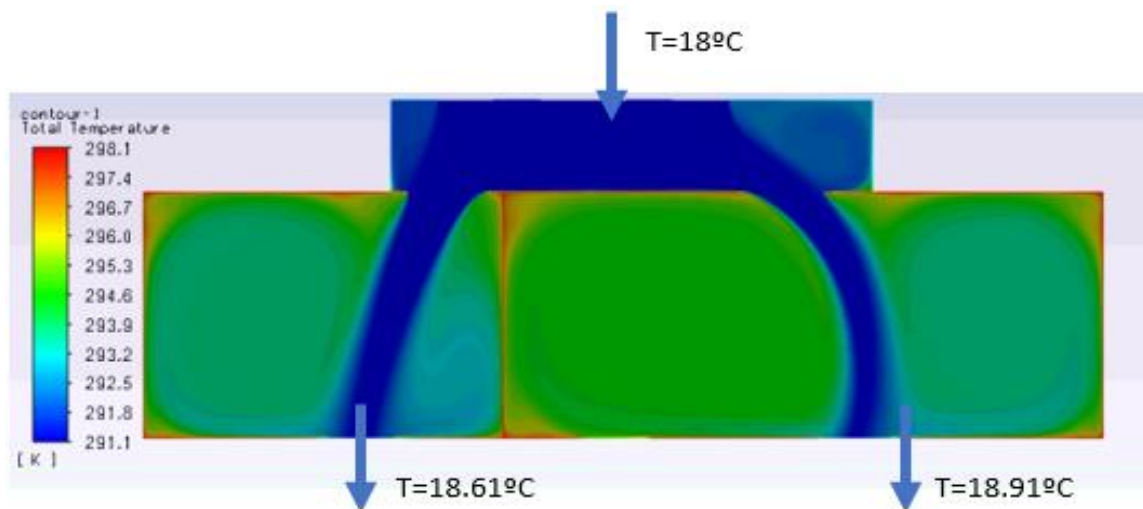


Figura 29: Contour de la temperatura en ventilación cruzada

ANEXO D. ENTORNO DE SIMULACIÓN

A. Materiales y elementos constructivos

A continuación, se detallan los diferentes materiales que forman el edificio, según la parte a la que pertenezcan entre los elementos constructivos. La caracterización de los materiales se hace basada en la experiencia, gracias a la reforma que se produjo en el año 1999; en la opinión de un arquitecto tras un análisis visual o en la información que se describe en el Plan General de Ordenación Urbana, PGOU, del Excelentísimo Ayuntamiento de Écija. Gracias a este documento se conoce que las edificaciones más antiguas se resuelven mediante muros de carga a base de tapial sobre los que se apoya directamente el forjado que, en estos casos, es de madera con rasillas formando la bóveda y dando así continuidad al paso. (Excelentísimo Ayuntamiento de Écija, 2009).

Aparte de la vivienda, se modela también una sombra a 3 m de distancia de la fachada de la casa, de alto 9 m y 12 m de ancho que simula la sombra que hacen los edificios pertenecientes a la misma calle.

A.1 Ventanas y carpintería

Por una parte, es necesario diferenciar entre los marcos y el vidrio, que juntos conforman el hueco. En la Tabla 1, se pueden ver todas las propiedades características de estos elementos que se han incluido en HULC.

Marcos	
Material	Madera de densidad media alta
Color	Marrón
Transmitancia	$2,20 W/m^2K$
Absortividad	0,7
Vidrios	
Tipo	Monolíticos en posición vertical
Transmitancia	$5,5 W/m^2K$
Factor solar	0,85
Hueco	
Porcentaje de hueco cubierto por marco	100 %
Incremento de transmitancia por intercalarios y cajones de persianas	Nulo
Permeabilidad al aire	$60 m^3/hm^2 a 100 Pa$
Transmitancia total de energía solar del acristalamiento con dispositivos de sombra móvil integrados	0
Transmitancia total del hueco	$2,2 W/m^2K$

Tabla 1: Propiedades de las ventanas y la carpintería

Se utiliza que el porcentaje de hueco cubierto por el marco es del 100% porque todas las ventanas que se analizan tienen contraventana y durante los días que no se ha hecho ventilación nocturna, siempre han estado completamente cerradas.

A.2 Cubiertas y techos

En la Tabla 2 se presentan los materiales elegidos en HULC, junto con sus características térmicas, para modelar la cubierta y los techos. Se muestran según su colocación de arriba hasta abajo, es decir, desde lo que está más expuesto al exterior hasta lo más interior.

Cubiertas y techos					
Material	Espesor	Conductividad	Densidad	Calor específico	Resistencia térmica
Teja de arcilla cocida	2 cm	1 W/mK	2000 kg/m ³	800 J/kgK	
Mortero de cemento o cal para albañilería y para revoco o enlucido	2 cm	1,3 W/mK	1900 kg/m ³	1000 J/kgK	
Plaqueta o baldosa cerámica	2 cm	1 W/mK	2000 kg/m ³	800 J/kgK	
Cámara de aire sin ventilar	10 cm				0,19 m ² K/W
Placa de yeso o escayola	2 cm	0,25 W/mK	825 kg/m ³	1000 J/kgK	
Transmitancia total de cubierta y techo			2,15 W/m²K		

Tabla 2: Propiedades de las cubiertas y los techos

Por otra parte, la absorptividad de la cubierta se define en 0,92, fruto de establecer la cubierta de color marrón oscuro.

A.3 Fachada y muros

La fachada está realizada con la técnica del tapial. Este dato se conoce gracias a las reformas que se llevaron en el año 1999. Es una técnica presente en el resto del municipio como se describe en la Memoria General del PGOU del Excelentísimo Ayuntamiento de Écija. (Excelentísimo Ayuntamiento de Écija, 2009). El material que se utiliza para modelar el tapial en HULC es la Tierra apisonada adobe bloques de tierra. En la Tabla 3 se muestran las propiedades de las fachadas y los muros según su colocación desde el exterior hasta el interior.

Fachadas y muros				
Material	Espesor	Conductividad	Densidad	Calor específico
Mortero de cemento o cal para albañilería y para revoco o enlucido	2 cm	1,3 W/mK	1900 kg/m ³	1000 J/kgK
½ pie LM métrico o catalán 40 mm<G<50	11,5 cm	0,991 W/mK	2170 kg/m ³	1000 J/kgK
Tierra apisonada adobe bloques de tierra	40 cm	1,1 W/mK	1885 kg/m ³	1000 J/kgK
½ pie LM métrico o catalán 40 mm<G<50	11,5 cm	0,991 W/mK	2170 kg/m ³	1000 J/kgK
Mortero de cemento o cal para albañilería y para revoco o enlucido	2 cm	1,3 W/mK	1900 kg/m ³	1000 J/kgK
Transmitancia total de cubierta y techo			1,30 W/m²K	

Tabla 3: Propiedades de la fachada y los muros

A.4 Forjados y suelos

El forjado se resuelve con un forjado unidireccional con vigueta de madera con entrevigado de revoltón de ladrillo y cascote. Las propiedades se pueden contemplar en la Tabla 4.

Forjado				
Material	Espesor	Conductividad	Densidad	Calor específico
FU con vigueta de madera	31 cm	1,335 W/mK	840 kg/m ³	800 J/kgK
Transmitancia total de forjado			2,69 W/m²K	

Tabla 4: Propiedades del forjado

El suelo por el que se opta es el mostrado en la Tabla 5.

Suelo				
Material	Espesor	Conductividad	Densidad	Calor específico
Plaqueta o baldosa cerámica	2 cm	1 W/mK	2000 kg/m ³	800 J/kgK
Transmitancia total de suelo			6,25 W/m²K	

Tabla 5: Propiedades del suelo

B. Condiciones de contorno

Al simular tan solo dos zonas se debía imponer para los espacios contiguos a estas, las debidas condiciones de contorno. De la mayoría de las zonas contiguas se conocían las temperaturas gracias a la campaña de monitorización. En primer lugar, en la Ilustración 1 se muestran los espacios contiguos al espacio “oficina”.

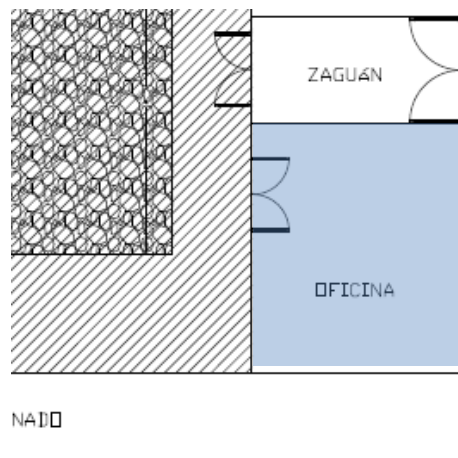


Ilustración 1: Espacios contiguos a oficina

En referencia a la Ilustración 1, la oficina limita arriba con el zaguán, del que se tienen los datos recogidos con el sensor 1; a la izquierda con el patio, del que se tienen datos recogidos por el sensor 4; a la derecha con la calle, en la que se tomará como espacio exterior y abajo limita con el pasillo que permitía el paso del ganado que es un espacio sin acondicionar, abierto por un extremo al patio trasero y por el otro extremo tiene una puerta de madera que da paso a la calle con muchas infiltraciones, por lo tanto se toma como si fuese un espacio exterior. Por último, en la planta superior está la habitación

fachada de la que también se tienen datos recogidos con el sensor 10 y de la que se muestran los espacios contiguos en la Ilustración 2.

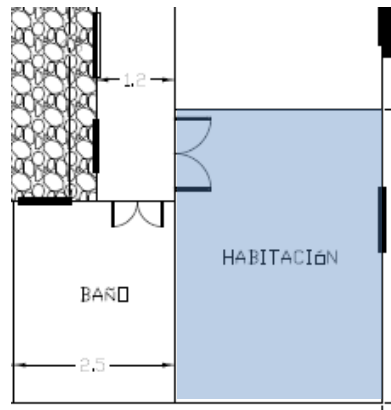


Ilustración 2: Espacios contiguos a habitación fachada

En referencia a la Ilustración 2, arriba de la habitación, está el salón del que se tienen datos de temperatura recogidos por el sensor 9; a la izquierda está la galería que da el patio y el baño, que son los únicos espacios de los que no se tiene datos de temperatura; a la derecha está la calle, por lo tanto es un espacio exterior y abajo está la casa del vecino, de la que tampoco se tienen datos y en este caso se impondrá que esta pared sea adiabática. En la parte superior está la cubierta. Para imponer las temperaturas en los espacios en los que no se ha recogido información, se asume un pequeño riesgo al imponer las temperaturas de espacios que son contiguos a estos, con características constructivas y usos parecidos. Por ejemplo, en el caso del baño, se utilizará el promedio entre la temperatura recogida por el sensor 8 y la recogida por el sensor 10. En la Ilustración 3 se muestra como la habitación de la izquierda al baño, donde está el sensor 8 y la habitación de la fachada, donde está el sensor 10 son espacios contiguos al baño.

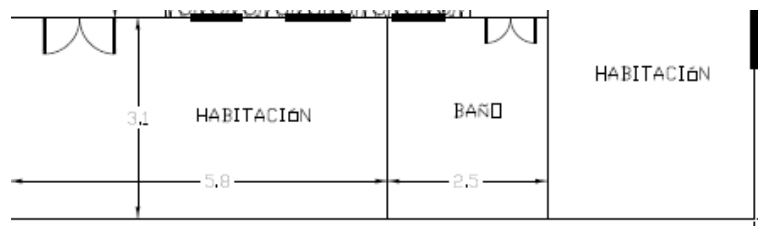


Ilustración 3: Habitaciones contiguas al baño

En el caso de la galería, se utilizará la temperatura promediada en el baño, puesto que la galería representa la menor longitud compartida con la habitación en estudio, de entre todas las estancias anteriores.

C. Comportamiento del edificio

En este apartado se mostrarán los resultados que se obtienen tras la modelización y simulación del edificio en HULC para ambas habitaciones. Se obtiene el comportamiento matemático y se justifican los resultados obtenidos en el *Capítulo 3. Análisis Cualitativo* para poder esclarecer qué efecto tienen cada una de las características constructivas que tiene esta vivienda y su utilidad en la reducción de la demanda de frío. Para la oficina se mostrará solamente cuál es el comportamiento cuando las ventanas

están cerradas pues en esta zona no se ha llevado a cabo el experimento de la ventilación nocturna. Por el contrario, para la habitación fachada si que se mostrará el comportamiento cuando no se abren y cuando se abren las ventanas durante la noche. Los períodos elegidos para la validación son, en primer lugar, del 4 al 11 de agosto y del 7 al 16 de septiembre para los períodos sin ventilación y del 22 al 25 de julio para el período de validación con ventilación. En la Figura 1 se muestran los períodos de validación localizados durante el período de mediciones.

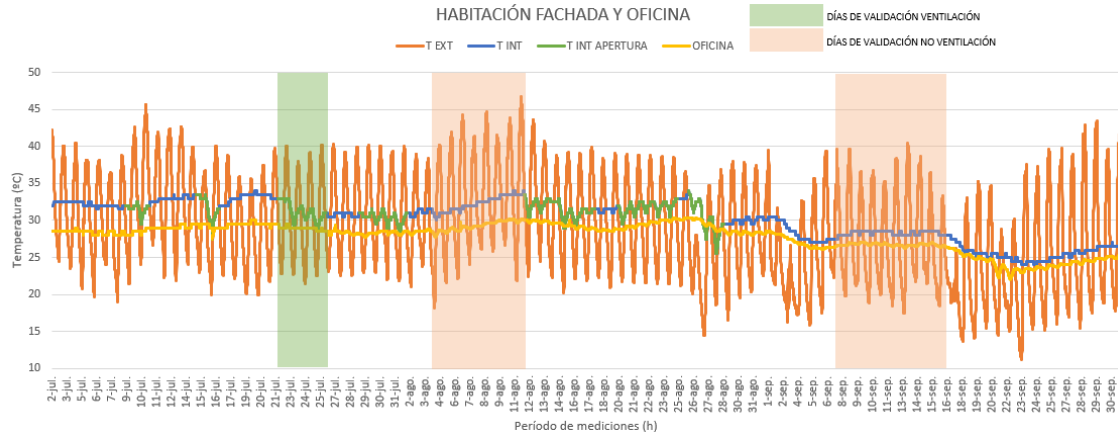


Figura 1: Períodos de validación

Durante la simulación es necesario imponer unos datos meteorológicos que para las capitales de provincias de España se pueden encontrar en la base de datos, pero no en el caso de Écija. Por lo tanto, se procedió a elaborar este archivo meteorológico a partir de los datos de SIAR de los meses de noviembre y diciembre del 2022 y los meses desde enero hasta octubre del año 2023.

Además, para poder obtener una simulación más fiel a la realidad, se ha optado por la inclusión de unas zonas contiguas a las habitaciones en estudio en las que se imponen las temperaturas que se han dado durante los días elegidos para la validación. Las zonas son las que se han descrito en el apartado B Condiciones de contorno. Sin la inclusión de estos recintos se tendría que escoger entre o bien, imponer condiciones exteriores en los contornos o bien, hacer adiabáticos los contornos. La geometría de la planta baja se muestra en la Ilustración 4.

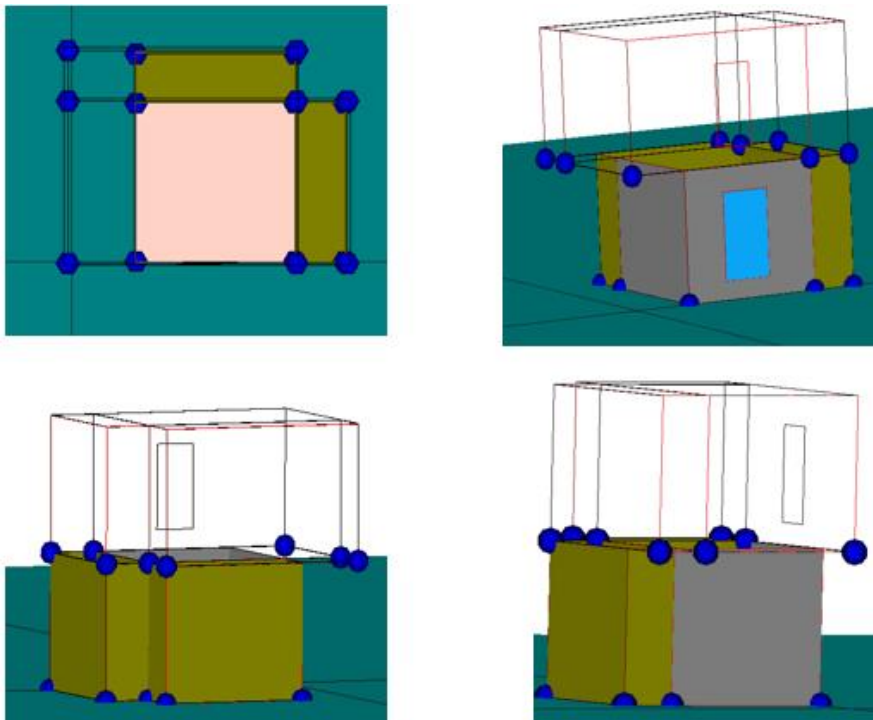


Ilustración 4: Geometría planta baja en la interfaz de HULC

De igual forma se muestra en la Ilustración 5 la geometría de la planta superior desde distintos puntos de vista de la interfaz de HULC.

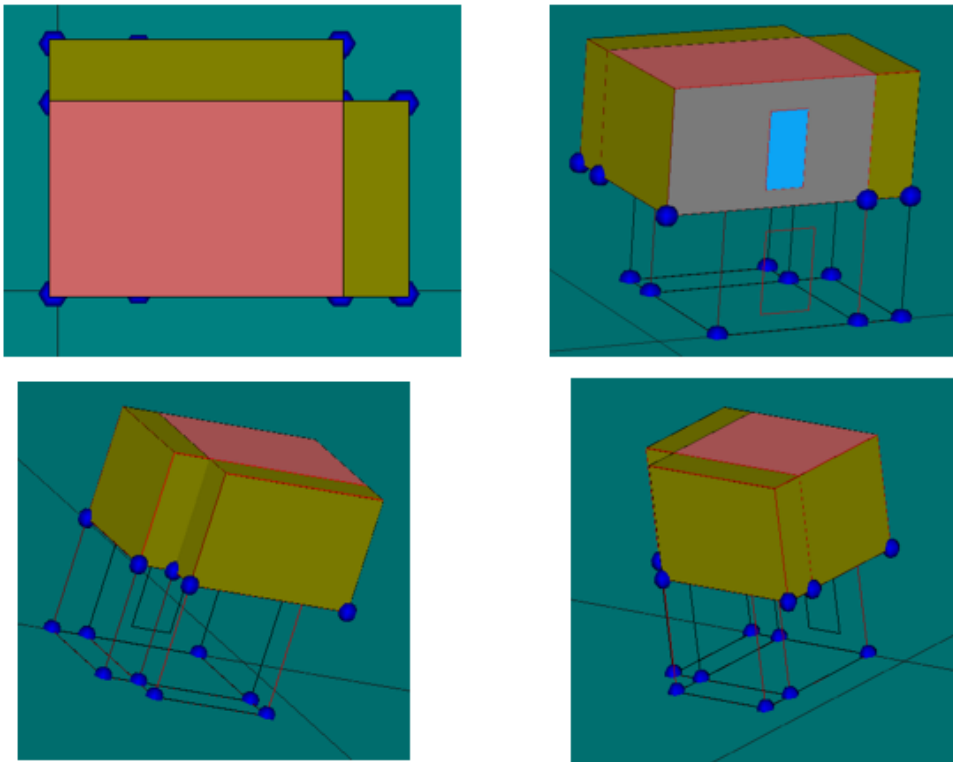


Ilustración 5: Geometría planta alta en la interfaz de HULC

Para poder fijar las temperaturas de los recintos, se utiliza la posibilidad que ofrece la HULC de seleccionar cuándo y a qué temperatura los equipos de acondicionamiento funcionan durante el año. Sin embargo, esta opción no puede ejecutarse sin que se determine previamente el edificio como un pequeño o mediano terciario en la pestaña de información general. Por lo tanto, se introdujeron todas y cada una de las temperaturas medidas con un intervalo horario y obtenidas en la campaña de monitorización para las estancias contiguas a la habitación fachada y la oficina durante los días de validación con la respectiva configuración para que los equipos estuviesen funcionando y fijasen las temperaturas deseadas.

Otro de los aspectos en los que se ha intervenido es la imposición de temperaturas, pero esta vez en las estancias en estudio durante los tres días precedentes a los períodos de validación, esto quiere decir entre los días 1 a 3 de agosto y 4 a 6 de septiembre para la validación sin ventilación y entre los días 19 a 21 de julio y 23 a 25 de agosto, para cuando hay ventilación. Con esto se consigue que la estancia comience la validación con un estado de excitación más próximo a la realidad, en vez de venir de un estado desconocido que imponga la herramienta por su cuenta.

Al establecer las condiciones operacionales también se puede establecer el caudal de ventilación que para el caso de los días de validación es completamente nulo y para los días con ventilación es 14 ren/h. Este último dato se introduce ya que es el caudal de aire con el que se consigue un comportamiento más próximo al recogido en la campaña de monitorización. Además, se pueden establecer otros parámetros como la ocupación, que es nula ya que en la realidad no se encuentran habitadas; la iluminación o los equipos, que se establecen en 0 W/área, ya que ni existen equipos en estas estancias, ni se encienden las luces puesto que no están ocupadas. Con todas estas condiciones impuestas, se procedió a hacer una primera simulación y los resultados que se obtuvieron fueron los que se muestran en la Figura 2 para el caso de la oficina durante el primer período de validación sin ventilación.

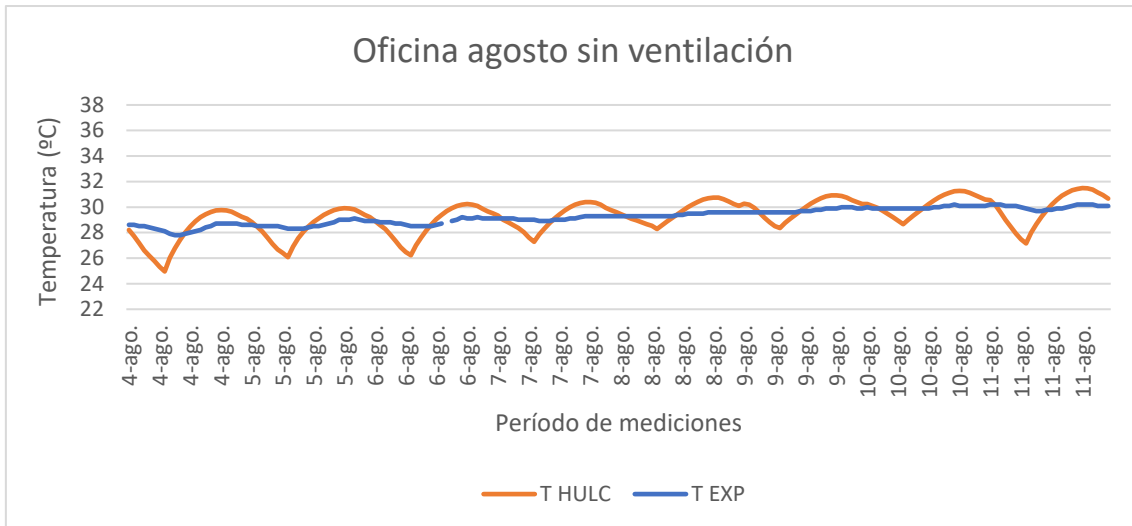


Figura 2: Comportamiento real y simulado en la oficina en el primer período sin ventilación

También para el primer período, pero en este caso para la habitación fachada, se obtuvieron los resultados mostrados en la Figura 3.

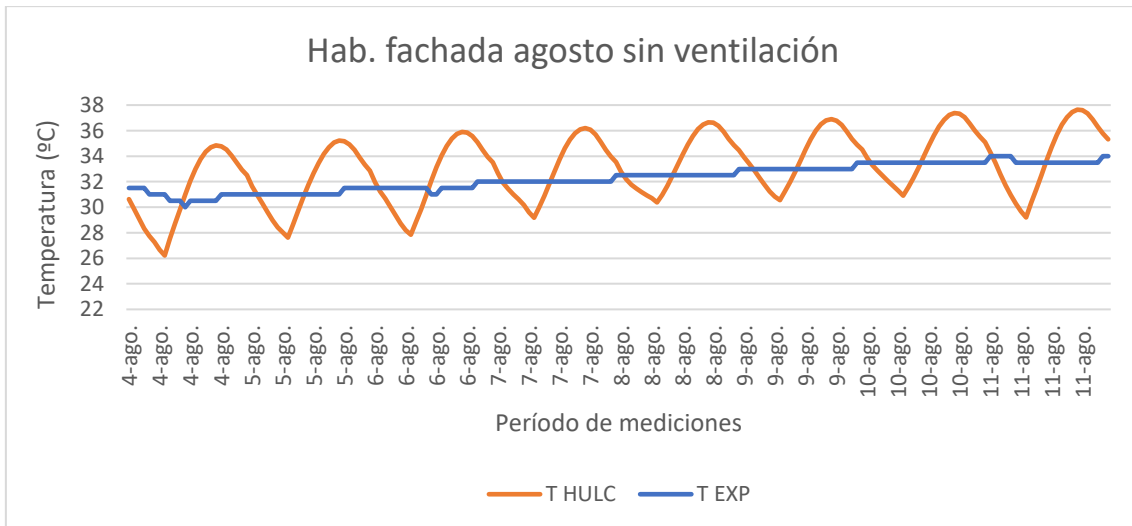


Figura 3: Comportamiento real y simulado en la habitación en el primer período sin ventilación

En ambas estancias se puede observar como el rango entre temperaturas máximas y mínimas es mayor de 5°C para las obtenidas en HULC y alrededor de 1°C para las experimentales. Además, se puede ver como los máximos y mínimos son aún más pronunciados en el caso de la habitación fachada, presumiblemente por la presencia de la cubierta. De todas formas, se procede también con la simulación para el segundo período sin ventilación. El caso de la oficina es el que se muestra en la Figura 4.

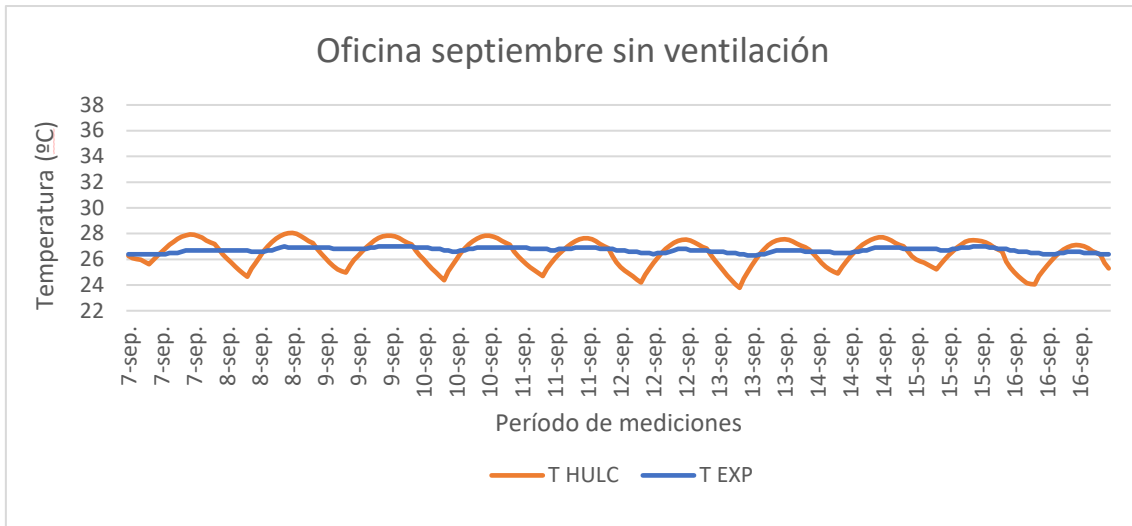


Figura 4: Comportamiento real y simulado en la oficina en el segundo período sin ventilación. Al igual que para el primer período, también se muestra la situación de la habitación para el segundo período sin ventilación en la habitación fachada, la habitación de la segunda planta, en la Figura 5.

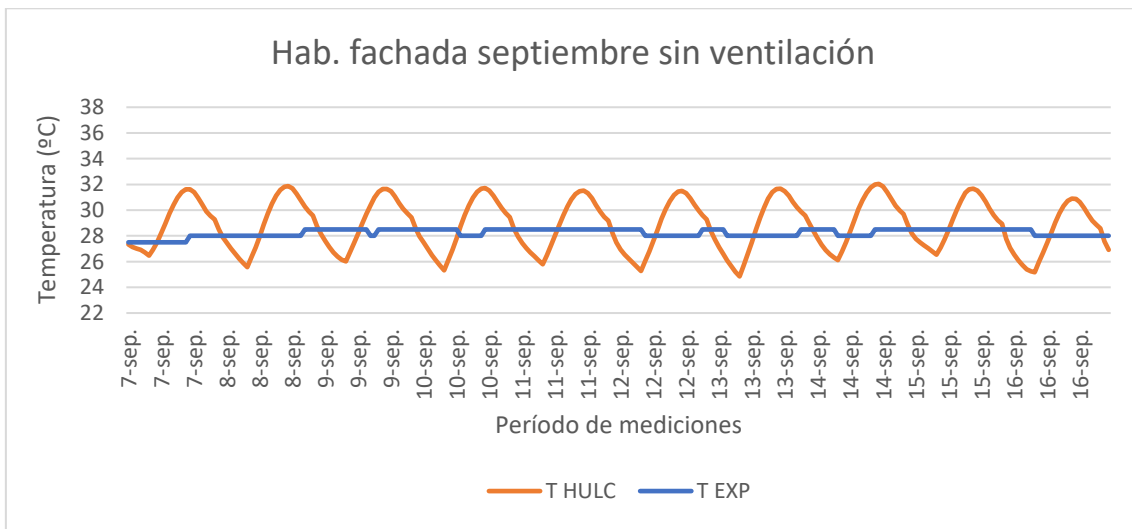


Figura 5: Comportamiento real y simulado en la habitación en el segundo período sin ventilación

Tanto en la Figura 4, como en la Figura 5 se pueden observar comportamientos parecidos a los ya comentados en el primer período de validación. Dado que no se ha obtenido un comportamiento cercano al de la realidad, no se procederá aún con la validación de los períodos de ventilación puesto que estos introducen más variables y por lo tanto una mayor complejidad.

Las hipótesis de por qué no se obtienen resultados próximos a la realidad son, en primer lugar, una errónea determinación de la inercia del edificio y, en segundo lugar, una absorptividad elevada en la cubierta, razón de peso para obtener una curva cuyos máximos diarios resultan más evidentes que los puntos en los que están las temperaturas mínimas diarias. Con estas dos hipótesis se proponen los siguientes cambios:

- Mejorar la inercia añadiendo mobiliario, ya que ambas estancias cuentan con numerosas piezas de mobiliario masivas realizadas en madera de alta calidad. Se proponen 500 kg/m^2 para el caso de la oficina y 1000 kg/m^2 en el caso de la habitación.

- Mejorar la inercia aumentando la densidad de los materiales que se han establecido. El hecho de conocer exactamente la construcción de la vivienda permite que exista un pequeño margen de error entre lo que se ha modelado y la realidad.
- Disminuir la absorptividad de la cubierta para poder reducir las temperaturas máximas. El valor que se utilizó en la primera simulación al seleccionar por defecto el color marrón oscuro puede ser demasiado elevado, ya que la absorptividad estaba definida en 0,92, un valor que se utiliza en cubiertas de colores muy próximos a negros, con absorptividad cercana a la unidad. Se propone para el nuevo caso un valor de la absorptividad de 0,6.

Afortunadamente, la implementación del primer y último cambio de los propuestos consiguieron que los datos fruto del comportamiento simulado de la vivienda se pareciesen a los datos obtenidos durante la campaña de monitorización. Por el contrario, el segundo cambio no permitía un acercamiento al comportamiento real, con lo que se confirma que la elección primera de los materiales fue adecuada.