



TESIS DOCTORAL

Metodología para la Caracterización y Confort Térmicos en Edificios Históricos

-

Methodology for Thermal Comfort and Characterization in
Historic Buildings

-

Metodologia per a la Caracterització i Confort Tèrmics en Edificis
Històrics

Autor:
Antonio Martínez Molina

Directores de Tesis:
Isabel Tort Ausina
José Luis Vivancos Bono

Mayo 2016

Agradecimientos

A mi familia por su apoyo incondicional en todo lo que hago.

A mis amigos por ayudarme y animarme en todo momento.

A mis directores de tesis Isabel y José Luis por su paciencia y consejo

Al personal del Museo de Historia de Valencia, y en particular a su director Javier Martí.

Al equipo docente del C.E.I.P. Fabián y Fuero, y en especial a Fernando Montero.

Resumen

En los últimos años, el interés por la eficiencia energética y el confort térmico en edificios históricos ha aumentado considerablemente, provocando la aparición, especialmente en Europa, de diferentes proyectos de investigación. El desafío de combinar la necesidad de preservación de los edificios y su identidad y valor patrimonial, con la exigencia de reducir el consumo energético y la mejora de las condiciones de confort interior, genera una polémica entre dos puntos de vista que están generalmente enfrentados, rehabilitación y comportamiento energético. Se ha realizado una extensa revisión bibliográfica acerca de la eficiencia energética y confort térmico en edificación patrimonial. Los resultados obtenidos son sorprendentes, ya que un campo de trabajo común está creciendo, mientras permanece la necesidad de mantener el equilibrio entre diferentes requerimientos. Por lo tanto, resulta obvio que muchas preguntas necesitan ser respondidas, por ejemplo, acerca de la correcta evaluación del consumo energético y el confort térmico en este tipo de edificios, la eficacia de las medidas que pueden ser adoptadas, y muchas otras cuestiones. Esta tesis doctoral aporta respuestas a esta problemática, desarrollando un proceso de análisis del comportamiento energético de edificios históricos. Este procedimiento ofrece unas directrices para la evaluación energética de edificios históricos, teniendo en cuenta datos experimentales para gestionar la incertidumbre de la estimación del balance energético y el confort térmico. Todo esto revela un método de simulación del comportamiento energético de edificios mediante un modelo dinámico, teniendo también en cuenta la satisfacción del confort térmico interior para aumentar la precisión del análisis energético. Este procedimiento es aplicado a dos casos de estudio reales para ofrecer al lector una visión experimental.

Abstract

In the last years the attention on the energy efficiency of historical buildings grew, as different research projects took place across Europe. The attention on combining, the need of the preservation of the buildings, their value and their characteristics, with the need of the reduction of energy consumption and the improvements of indoor comfort condition, stimulates the discussion of two points of view that are usually in contradiction, preservation and energy performance. An extensive literature review of energy efficiency and thermal comfort in historical buildings is presented and the results are surprising because a common field of work is growing while remains the need of balancing the respective exigencies. From these experience, it results clear that many questions should be answered regarding the correct assessment of the energy consumption and thermal comfort of this class of buildings, the effectiveness of the measures that could be adopted, and much more. This thesis gives a contribution to answer to these questions, developing a procedure to analyze the historic building energy performance. The procedure gives a guideline of the energy audit for the historical building considering also the experimental activities to deal with the uncertainty of the estimation of the energy balance and the thermal comfort. It offers a procedure to simulate the energy balance of building, with a dynamic model considering also an indoor thermal comfort satisfaction to increase the accuracy of the energy performance evaluation. All the process is applied to two real case studies to give to the reader a practical understanding.

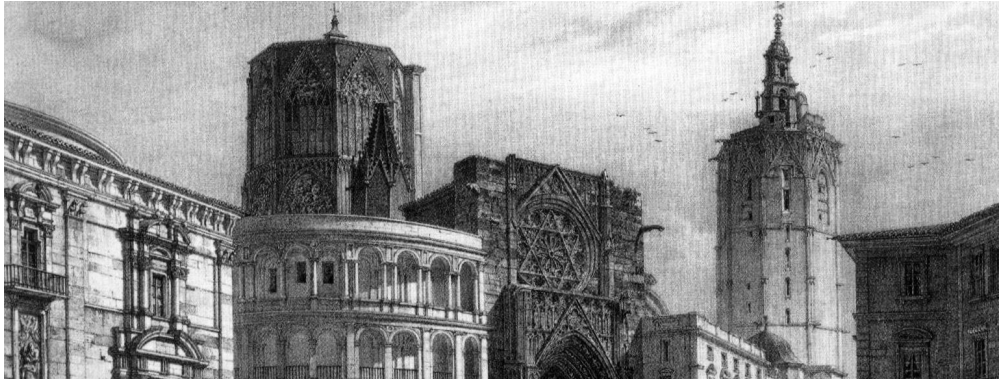
Resum

Als darrers anys, l'interès per l'eficiència energètica i el confort tèrmic en edificis històrics ha augmentat considerablement, provocant l'aparició, especialment a Europa, de diferents projectes d'investigació. El repte de combinar la necessitat de preservació dels edificis i la seua identitat i valor patrimonial, amb l'exigència de reduir el consum energètic i la millora de les condicions de confort interior, genera una polèmica entre dos punts de vista que romanen generalment enfrontats: conservació i comportament energètic. S'ha dut a terme una extensa revisió bibliogràfica al voltant de l'eficiència energètica i confort tèrmic en edificació patrimonial. Els resultats obtinguts són sorprenents, ja que està creixent un camp de treball comú, mentre que continua la necessitat de mantenir l'equilibri entre diferents requeriments. Per tant, resulta obvi que moltes preguntes necessiten ser respostes; per exemple, al voltant de la correcta avaluació del consum energètic i confort tèrmic en aquest tipus d'edificis, l'eficàcia de les mesures que poder ser adoptades, i moltes altres qüestions. Aquesta tesi doctoral aporta respostes a aquesta problemàtica, desenvolupant un procés d'anàlisi del comportament energètic d'edificis històrics. Aquest procediment ofereix unes directrius per a l'avaluació energètica d'edificis històrics, tenint en compte dades experimentals per a gestionar la incertesa de l'estimació del balanç energètic i el confort tèrmic. Tot plegat, revela un mètode de simulació del comportament energètic d'edificis mitjançant un model dinàmic, considerant també la satisfacció del confort tèrmic interior per augmentar la precisió de l'anàlisi energètic. Aquest procediment és aplicat a dos casos d'estudi reals per oferir al lector una visió experimental.

Índice

Capítulo 1.	Introducción.....	I
1.1.	Planteamiento del Problema.....	2
1.2.	Justificación e Importancia de la Investigación.....	5
1.3.	Objetivos de la Investigación.....	7
1.4.	Organización y Síntesis.....	9
Chapter 2.	State of the Art.....	II
2.1.	Methodology of the literature review.....	12
2.2.	Precedents.....	13
2.2.1.	History of the Publication on Historic Buildings.....	13
2.2.2.	Interest in Historic Buildings Around the World.....	15
2.2.3.	Ages of the Historic Buildings Studied.....	16
2.2.4.	Literature Review Purposes.....	17
2.3.	Type of Historic Buildings.....	18
2.3.1.	Residential Use.....	19
2.3.2.	Religious Use.....	24
2.3.3.	Academic and Palace Use.....	29
2.3.4.	Museum, Library and Theatre Use.....	33
2.3.5.	Urban Areas.....	36
2.3.6.	Other uses.....	40
2.4.	Discussion.....	45
2.5.	Results y Partial Conclusions.....	46
Capítulo 3.	Metodología de los casos de Estudio.....	49
3.1.	Descripciones de los Edificios.....	50
3.1.1.	Museo de Historia de Valencia.....	50
3.1.2.	CEIP Fabián y Fuero, Villar del Arzobispo.....	62
3.2.	Monitorizaciones Meteorológicas e Interiores.....	72
3.2.1.	Monitorización del Museo de Historia de Valencia.....	75
3.2.2.	Monitorización del CEIP Fabián y Fuero.....	79
3.3.	Estudios Estadísticos del Confort Térmico.....	84
3.3.1.	Estudio Estadístico del Confort Térmico en el MHV.....	89
3.3.2.	Estudio Estadístico del Confort Térmico en el C.E.I.P. Fabián y Fuero, Villar del Arzobispo.....	93
3.4.	Modelizaciones.....	98
3.4.1.	Modelización del Museo de Historia de Valencia.....	102
3.4.2.	Modelización del CEIP Fabián y Fuero.....	104

Capítulo 4. Resultados de los Casos de Estudio.....	107
4.1. Museo de Historia de Valencia.....	108
4.1.1. Monitorización Meteorológica e Interior.....	108
4.1.2. Estudio Estadístico.....	116
4.1.3. Simulación Energética.....	124
4.1.4. Optimización / Rehabilitación Energética.....	130
4.2. C.E.I.P. Fabián y Fuero.....	134
4.2.1. Monitorización Meteorológica e Interior.....	134
4.2.2. Estudio Estadístico.....	142
4.2.3. Simulación Energética.....	153
4.2.4. Optimización / Rehabilitación Energética.....	159
 Conclusión.....	 165
Síntesis de los Resultados Más Importantes.....	166
Futuras Líneas de Trabajo.....	168
 Conclusion.....	 169
Synthesis of the Most Important Results.....	170
Future Research Lines.....	171
 Bibliografía.....	 173



Capítulo I. Introducción

La eficiencia energética y confort térmico en edificios históricos se han convertido en temas muy actuales en los últimos años. Investigaciones recientes han demostrado que la adaptación a los actuales estándares de eficiencia energética y confort térmico, es esencial para mantener adecuadamente el patrimonio histórico construido. Este capítulo aspira a ofrecer al lector una idea general del porqué de la elección de la temática de esta tesis, los objetivos de la investigación y la estructura de la misma.

1.1. Planteamiento del Problema

El incremento del consumo energético a nivel mundial está creciendo de manera alarmante. De acuerdo con la Agencia Internacional de la Energía (IEA), desde 1971 hasta 2014, el consumo energético mundial ha crecido un 92% [1]. El sector de la edificación contribuye enormemente a este aumento. El Programa Medioambiental de las Naciones Unidas (UNEP) atribuye a la edificación, más del 30% de las emisiones mundiales de gases de efecto invernadero, y un 40% del total de la energía consumida [2]. La comunidad internacional ha dado importantes pasos para recortar estas tendencias. Por ejemplo, las mayores potencias mundiales (Estados Unidos, Europa y China), han implementado importantes medidas dignas de ser mencionadas.

Los Estados Unidos de América adoptaron normativas y regulaciones federales para controlar los niveles de eficiencia energética de los nuevos productos, incluyendo electrodomésticos (*“Appliance standards”*) y edificios (*“Building energy codes”*). La nueva normativa sobre los electrodomésticos (*“Appliance standards”*) regula el consumo energético de sistemas de calefacción, aire acondicionado, agua caliente sanitaria, grandes electrodomésticos y sistemas de iluminación, además de otros dispositivos. Cada estado, individualmente, puede elegir regular los elementos no recogidos en estas normativas. Las reglamentaciones federales requieren además, del etiquetado de eficiencia energética en electrodomésticos y otros aparatos que utilicen energía; la voluntaria, pero ampliamente utilizada etiqueta *“Energy Star”*, certifica las opciones más eficientes energéticamente. Por otro lado, las normas energéticas de edificios o *“Building Energy Codes”*, regulan de manera global el comportamiento energético de los edificios, centrados especialmente en la envolvente de los mismos. La utilización de las estrategias de certificación energética de edificios está creciendo y la puntuación del sistema de calificación energética de viviendas o *“Home Energy Rating System”* (HERS) ha pasado a ser un obligado prerequisite para las hipotecas de eficiencia energética o *Energy Efficiency Mortgages* (EEM) [3] y las certificaciones de viviendas *“Energy Star”*.

El gobierno de los Estados Unidos también persigue reducir el consumo energético en edificaciones residenciales y comerciales, incentivando a los consumidores y obligando a alcanzar los objetivos de la normativa aplicable. Beneficios fiscales, incluyendo salariales, de propiedad y de venta, son ofrecidos a los consumidores a todos los niveles de gobierno. A cambio de estos beneficios fiscales, los programas de gestión de la demanda (DSM), supervisados por las comisiones públicas del estado, fomentan el decrecimiento del consumo energético promoviendo la reducción voluntaria de la demanda energética. Además, las iniciativas políticas de la Casa Blanca incluyen un compromiso de convertir los edificios comerciales un 20% más eficientes en 2020, y una ordenanza directiva (“*Executive Order 13514*”) la cual obliga a que, a partir de 2030, todos los nuevos edificios federales se diseñarán bajo las directrices de los edificios de energía cero (nZEB). El gobierno del presidente Obama prometió por otro lado, reducir la energía consumida por las viviendas entre un 30% y un 50% basándose en los niveles de consumo de 2009, sin embargo, no existen fechas concretas para cumplir esta promesa [4].

La Unión Europea por su parte, desarrolló dos estrategias para combatir las emisiones de CO₂ y promover la eficiencia energética en edificación. Primero, la Certificación Energética de Edificios (EPC) fue creada a principios de los años 90 como un método esencial para la reducción del consumo energético y las emisiones de CO₂ [5]. Ya en 2007, la Unión Europea adoptó también una estrategia de política energética llamada Horizonte 20-20-20 (H2020) como otra iniciativa para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero. Dentro de esta propuesta, los países europeos acordaron reducir la emisión de gases de efecto invernadero y el consumo energético en un 20%, incrementar la fuentes de energía renovables en otro 20%, y aumentar la eficiencia energética en el sector de la edificación en un 20% también [6]. Varios métodos, leyes, y proyectos han sido implementados con el objetivo de alcanzar lo acordado por el programa H2020; sin embargo, los esfuerzos se han centrado en la construcción de nuevos edificios eficientes y la remodelación de los antiguos [7]. Los edificios

históricos han sido alejados del primer plano de las iniciativas del H2020 y de la certificación energética.

Las políticas de eficiencia energética de China están mayormente definidas e impuestas a nivel nacional, aunque son implementadas a nivel provincial y municipal. El sistema de estas estrategias consiste en leyes y reglamentos en los que se basan los principales planes y directrices nacionales. El undécimo plan quinquenal (2006-2010), por ejemplo, tuvo como objetivo nacional la reducción del consumo de energía en un 20% y potenciar considerablemente la fortaleza de las políticas de eficiencia energética. Por su lado, el duodécimo plan quinquenal (2011-2016) se centra en la reducción de las emisiones de CO₂. China ha hecho también el esfuerzo de asegurar su cumplimiento con normativas energéticas que regulan la envolvente, además de las instalaciones en edificios de nueva construcción. Asimismo, fueron adoptados niveles mínimos de eficiencia en electrodomésticos y se puede observar un incremento en el control y cumplimiento de estos parámetros. China promueve un programa de certificación de eficiencia energética voluntario en electrodomésticos, y utiliza el mismo sistema de certificación que la Unión Europea. Por otro lado, existen beneficios sobre el impuesto de sociedades para fomentar la utilización de tecnologías y medidas de eficiencia energética. Al igual que en los Estados Unidos y Europa, los edificios históricos en China se quedan al margen de las políticas e iniciativas de eficiencia energética.

La sostenibilidad energética es *“una manera de gestionar y limitar el crecimiento del consumo energético”* [8]. Un edificio es por lo tanto eficiente energéticamente *“si ofrece más servicios a cambio del mismo consumo energético, o los mismos servicios por menor gasto energético”* [8]. Debido a la dificultad de adoptar medidas de eficiencia energética que no comprometan los valores arquitectónicos y patrimoniales que se deben conservar, la inmensa mayoría de normativas de eficiencia energética, no contemplan la edificios históricos, lugares de culto, y otros edificios con usos especiales y/o de un importante valor artístico o histórico [9]. Sin embargo, recientemente algunos países europeos se han dado cuenta de que no pueden

ignorar el patrimonio construido. Por otra parte, la rehabilitación del patrimonio edificado se enfrenta a un conflicto entre los nuevos métodos para mejorar la eficiencia energética y el mantenimiento de los valores de la edificación. Asimismo, la percepción personal del confort térmico (*“Condición mental que expresa satisfacción respecto a entorno térmico y es analizada mediante la evaluación subjetiva”*) debe tenerse muy en cuenta [10]. Equilibrar la eficiencia energética, las obligadas necesidades de conservación del patrimonio arquitectónico, y el confort térmico de los usuarios no resulta una tarea fácil.

El principal objetivo de la renovación arquitectónica es alcanzar este obligado equilibrio y conseguir mantener los edificios restaurados para las futuras generaciones con la máxima preservación de los valores patrimoniales. La manera más adecuada de mantener el patrimonio edificado y alejarlo de caer en el desuso, es adaptándolo a los actuales niveles de eficiencia energética y confort térmico. Consiguiendo esto, no sólo se alargará la vida útil de los edificios históricos, sino que además nos permitirá disfrutarlos y admirarlos a las generaciones presentes y futuras por igual.

1.2. Justificación e Importancia de la Investigación.

Los edificios históricos marcan la identidad de numerosas ciudades y pueblos europeos; los centros y barrios históricos dan singularidad a nuestras ciudades. Son pues, un símbolo vivo del gran patrimonio y la diversidad cultural de Europa. Estas áreas son extremadamente valiosas ya que reflejan la identidad de la sociedad, y por lo tanto, deben ser protegidas. Sin embargo, estas zonas son también, donde el alto nivel de ineficiencia energética contribuye ampliamente a las emisiones de gases de efecto invernadero, en su mayoría, debido a su deficiente aislamiento, instalaciones obsoletas y el inevitable cambio del uso original. Siendo el cambio climático una amenaza real y urgente para la humanidad y su entorno, es necesario actuar en consecuencia y mejorar el enfoque de los proyectos de rehabilitación en edificios históricos.

Analizando las cifras, más de 150 ciudades y áreas urbanas constan como Patrimonio Cultural de la Humanidad en Europa. Esto pone de manifiesto la importancia del patrimonio cultural construido; aquí están incluidas más de 55 millones de viviendas en toda Europa que datan de antes de la segunda guerra mundial, con más de 120 millones de europeos residiendo en estos edificios [11].

La "Vieja Europa" es un importante reclamo para turistas de todo el mundo, y mantener este interés tiene un importante impacto económico. El patrimonio cultural es una de las principales contribuciones a los ingresos del turismo, que representa el 5,5% del PIB de la Unión Europea, genera más del 30% de sus ingresos del comercio exterior, y emplea al 6% de la población activa de la Unión Europea. Además, el turismo tuvo un crecimiento del 57% desde 1995 hasta 2010. En mayo de 2008, la Asamblea de las Regiones de Europa (ARE), Comisión 3, participando en ella los políticos y oficiales regionales de toda Europa, destacó el lugar del turismo cultural y su impacto en el sector del empleo [12]. Alan Clarke, experto en la Universidad de Panonia, Hungría, declaró que "El desarrollo del turismo cultural no sólo desarrolla el conocimiento, el orgullo y la identidad histórica local, sino que también ayuda a conservar el patrimonio cultural, fomentar el crecimiento económico y crear nuevas oportunidades de empleo" [13].

De acuerdo con todo lo anterior, y en el contexto del continuo aumento de precios de los combustibles fósiles (por ejemplo, gas y petróleo), la seguridad energética y la protección del clima, existe una clara necesidad de reducir el uso de energía en estos edificios, ya que constituyen un enorme porcentaje del parque construido alrededor de toda Europa. Más de una cuarta parte de la edificación europea data de antes de 1945, siendo sus emisiones estimadas de CO₂, asociadas a la demanda energética, alrededor de 240Mt, definitivamente una cantidad nada despreciable [11]. Por otro lado, el confort de los usuarios y el "confort" de colecciones artísticas patrimoniales son también factores muy importantes a tener en cuenta.

Se puede alcanzar una importante reducción de la demanda energética en edificios históricos, consiguiendo respetar su valor patrimonial, si desde un enfoque multidisciplinario se garantiza la aplicación de soluciones de gran eficiencia energética adaptadas a cada caso en concreto. Asimismo, es necesaria la participación y la concienciación de la población, sobre la necesidad del correcto uso de la energía, lo cual tiene un enorme potencial en edificios históricos.

1.3. Objetivos de la Investigación.

Desde la experiencia de otros proyectos y casos de estudio, varias cuestiones continúan sin resolver, especialmente las relacionadas con la eficacia de las medidas de ahorro energético, con la evaluación de las medidas adoptadas y la elección de una solución energética u otra. Con esta tesis se intenta contribuir a dar respuestas a esta problemática. Resulta de una importancia capital el papel de las autoridades encargadas de la conservación del patrimonio, y sin ninguna duda, el punto de partida es el conocimiento en profundidad del comportamiento térmico real del edificio, sólo así podremos implementar, de la manera correcta, las medidas para aumentar eficiencia energética y entender la eficacia de las mismas. Antes de comenzar este proceso se requiere un detallado y preciso análisis, capaz de describir, tanto como sea posible, el comportamiento térmico real de la edificación. Resulta también obvio que la utilización de un modelo de simulación energética sería insuficiente por si solo, ya que existiría demasiada incertidumbre dependiendo de la precisión y sensibilidad de los técnicos responsables del modelado. Por lo tanto, los datos de la monitorización “in situ” son vitales para conocer el comportamiento real del edificio y de los usuarios, y así ayudar en la construcción del modelo. Como se puede comprobar en este estudio, se realizó un extensa recolección de datos experimentales en diferentes fases de la investigación, con el fin de conocer el comportamiento de los edificios. Esta tesis se puede dividir en tres partes bien diferenciadas, la extensa revisión bibliográfica, el estudio estadístico del confort térmico de los ocupantes de los dos casos de estudio, y por último la simulación energética

junto con las propuestas para la rehabilitación energética de los edificios analizados; el Museo de Historia de Valencia (MHV) y el C.E.I.P. Fabián y Fuero de Villar del Arzobispo, Valencia. Estas dos construcciones representan perfectamente dos opciones muy comunes en los edificios históricos; restaurados, uno de ellos con diferente uso al original y con la exigencia de estándares actuales de confort por parte de los usuarios. Se desarrollan diferentes estrategias de rehabilitación energética teniendo en cuenta soluciones pasivas y activas, desde la mejora de rendimiento térmico de la envolvente, hasta la utilización de la ventilación natural, pasando por la mejora de las instalaciones. El objetivo principal no es sólo la implementación de una estrategia para alcanzar los mejores niveles de eficiencia energética para reducir el consumo, sino hacerlo consiguiendo un confort interior óptimo. Este se centra en la combinación de un profundo estudio de proyectos anteriores, extensa recolección de datos del comportamiento energético del edificio y la satisfacción del confort térmico de los usuarios. Todo ello ayudará a la construcción del modelado de los edificios mediante programas de simulación energética. El resultado será un conjunto de soluciones muy cercanas a las óptimas, que podrían ser utilizadas en el proceso multidisciplinario de toma de decisiones, para decidir qué conjunto de medidas deben adoptarse.

Las principales cuestiones que se han tratado de resolver son las siguientes:

- ¿Está la comunidad científica dando los pasos necesarios para avanzar en este tipo de problemática?
- ¿Es posible alcanzar altos niveles de eficiencia energética en edificios históricos? ¿Se puede conseguir esto manteniendo su valor patrimonial?
- ¿Existe la posibilidad de mejorar el confort térmico interior a la vez que incrementamos la eficiencia energética y mantenemos la identidad del edificio?

1.4. Organización y Síntesis.

Esta tesis se divide en cuatro apartados bien diferenciados.

El primero, coincide con la dilatada revisión bibliográfica realizada sobre la investigación llevada a cabo en eficiencia energética y confort térmico en edificación histórica.

En la segunda parte se exponen los resultados de uno de los estudios experimentales, la monitorización interior y medioambiental. El objetivo de este proceso es claro; el análisis de las construcciones y de su entorno para reducir la incertidumbre en la estimación de la energía utilizada. Esto es aplicado a dos casos de estudio para dar dos ejemplos prácticos y plantear posibles soluciones a dos casos de estudio reales.

El tercer apartado se centra en mostrar los resultados de la segunda investigación experimental, la encuesta de satisfacción subjetiva del confort térmico interior. Esto tiene como principal propósito, conocer de qué manera los edificios estudiados consiguen satisfacer los requisitos ambientales de los usuarios. Esto permite proporcionar la información necesaria para individualizar el trabajo mediante la detección de deficiencias de confort no estandarizados y afinar los parámetros ambientales a alcanzar.

En el cuarto apartado, se presenta un procedimiento de optimización para la fase de diseño de la rehabilitación energética. En primer lugar varios aspectos de los modelos son investigados individualmente: estrategia de control ambiental, el modelo de ocupación, la ventilación natural, etc. En segundo lugar estos parámetros se combinan entre sí para configurar una estrategia general, con el objetivo de afrontar la toma de decisiones y así optimizar la rehabilitación energética. Se plantean tanto medidas activas como pasivas, para poder así cumplir con todas las exigencias planteadas al principio de la investigación.

En la última parte de esta tesis se presentan los principales resultados, conclusiones y trabajos futuros.



Chapter 2. State of the Art

This chapter presents an extensive literary review of the different research works that have analyzed the possibility of increasing energy efficiency or thermal comfort in historical buildings. Different experiences and projects around the world, pertaining to the interaction between the aspects of conservation of heritage, energy efficiency and thermal comfort, are examined. Limitations on interventions, the needs to be addressed, and the most outstanding performances, are analyzed chronologically and geographically. The chapter ends with the exhibition of the partial findings.

2.1. Methodology of the literature review.

The methodology for conducting the literature review consisted of carefully extracting, through the comprehensive analysis of the consulted documentation, valuable contributions to the proposed line of research. Given the multidisciplinary nature of this topic, the available publications have been found to be very multi-faceted; it was therefore necessary to resort to a wide variety of sources to collect the essential data. As a result, the following sources have been identified:

- Articles from high-impact scientific journals
- Talks and presentations from international scientific congresses
- Specialized bibliographies
- Official reports from the European Community
- Consulted theses
- Technical information from institutional web pages
- International regulations.

This list of sources is compiled in the diminishing order of reliability. The level of scientific analysis is therefore consistent with scientific quality.

The method consisted of gathering information on the proposed subjects. The information gathered mainly focused on energy efficiency and thermal comfort in heritage building, studies of the indoor environmental conditions of the same, and appropriate simulation and experimental methods.

The process began with the search of bibliographic material related to the subject in question. The first approach focused on international legislation in the main countries concerned as well as the official information of various organizations. An initial observation revealed that, due to the sheer abundance of the rules and regulations, careful analysis of the documents would have been a

useless target and an unreachable goal within the marked timeframe. Despite this widely-accepted conclusion, the scientific community had already accepted the challenge, especially in recent years, and has tried to learn about the energy performance of these unique buildings. This has resulted in a profusion of extensive review articles and scientific communications. More than one hundred of such projects are cited in this chapter. Additionally, a small number of dissertations and specialist literature are also considered in this thesis. All of the foregoing manages to compose an extensive scientific collection, which proved vital for development this PhD thesis.

Once this extensive literature was read and analyzed, the most relevant information of each document was extracted. The data was then managed and qualified in terms of the various inquiries such as the year of publication, the type of building analyzed, the origin of the author, the location of the building and the techniques used, the purpose of the study, and different combinations of the aforementioned.

Below are the most relevant conclusions that have been obtained from this comprehensive literary review.

2.2. Precedents

2.2.1. History of the Publications on Historic Buildings

Early studies and publications related to energy efficiency refurbishments of historic buildings began to emerge in the late 1970's and early 1980's [14–19]. Fig. 1 shows the number of research papers published from 1978 to 2014 in comparison to global Gross Domestic Product (GDP) levels. While Fig. 1 illustrates a general increase in publications over time, one visible and noteworthy correlation between GDP and research on energy efficiency in historic buildings is the decrease in publications during healthy economic times. The reverse is true as well; there have been definitive spikes in publications at times when GDP dipped, with the global financial crisis of 2007 serving as the most recent example. This association can likely be attributed to the fact that

economic stagnation tends to result in increases in savings policies. The focus thereby shifts from new constructions to refurbishment and restoration projections and the implementation of efficiency measures.

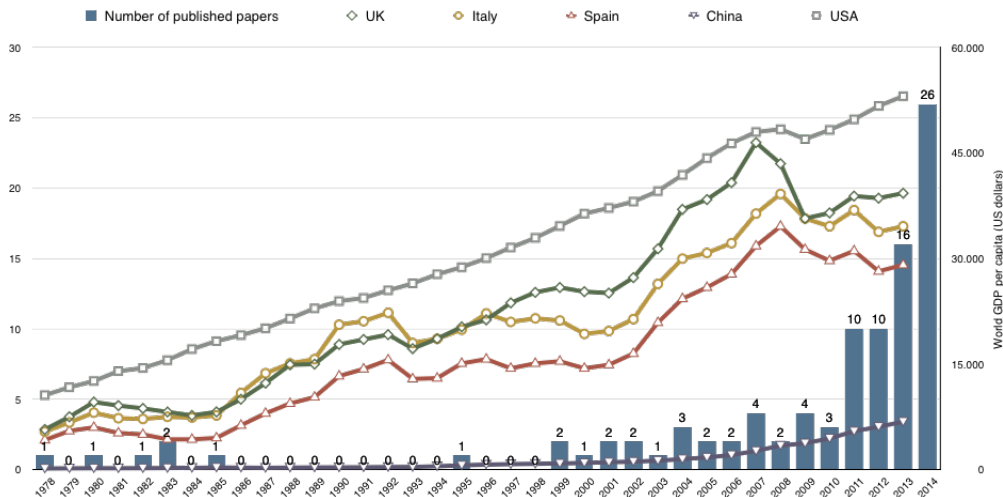


Figure 1. Number of Publications on Historic Building’s Energy Efficiency and Thermal Comfort in the World, compared to the GDP per capita of the most important countries in this research.

The correlation between GDP levels and publication volumes, as exemplified by Fig. 1, can be traced back to the time research on energy efficiency refurbishments of historic buildings first appeared. For example, it has been noted that the two oil crises in 1973 and 1979, which created the necessity for starting to seek measures for improving energy efficiency of historic buildings, likely explain the sudden rise in research initiatives during the late the 70’s and the early 80’s. Research from this period largely focused on reducing energy consumption in buildings by improving insulation and building envelope performance. As a result, energy efficiency design technologies, such as passive design, the use of solar systems, and calculation and prediction methods of energy consumption, began to emerge as new research paths for historic buildings [15,17–19].

Thereafter, as the global economy improved and the focus shifted to construction and development, interest in the refurbishment of historic buildings saw a stagnation. There were just two papers published in the fifteen-

year period between 1983 and 1998. Following the hiatus, research interests increased moderately from 1999 until 2010. Studies from this period began implementing monitoring techniques in order to analyze energy performance in historic buildings [20–22]. Technological advances, such as thermography [23,24], allowed for a better understanding of building envelopes. Comparisons between historic and new building techniques [23,25], indoor air condition analyses [26–28], and inhabitants' surveys were also introduced during that time [25,29].

From 2005 onward, some researchers have started projects focused in a new direction: artwork preservation [30–35]. Improving thermal comfort in historic buildings that hold artwork while, at the same time, respecting the heritage values of the buildings and keeping energy consumption within controlled ranges became a challenge for researchers between 2005 and 2010.

From 2011 to 2014, the volume of publications increased dramatically. Sustainable development relating to the rehabilitation of historic buildings was the theme of several studies from this time period. Research projects with economic perspectives, such as those that implemented life cycle tests [36–38] and economic viability analyses [38–42], also began to emerge. Between 2013 and the first half of 2014, research on energy efficiency in historic buildings diversified in terms of content and the types of buildings examined. For example, different methodologies were applied to study urban [43–47], rural [41,48–50], academic [51–53] and religious buildings [54–58], both individually and in urban areas [43–47]. Most of these studies focused on reusing heritage buildings and proposed suitable technical solutions for enhancing energy efficiency while maintaining building heritage values.

2.2.2. Interest in Historic Buildings Around the World

Research groups usually perform case studies of their own countries, where historic buildings are easily reachable. Sometimes, however, the strong built heritage of a country, like Italy, attracts scientists from abroad [25,26,31,32,37,41,46,48,50,59–64]. As illustrated in Fig 2, Italy is the country that has generated most of the energy efficiency in historic building research

[7,11,18,19,22,24,30,34,36,39,44,45,47,51,53-55,65-83]. Italy is followed by the UK [25,29,60,84-90], Spain [23,58,91-93] and China [43,49,94]. While there has been significant research done by international collaborators (represented by the “International” column in Fig. 2), those projects have often been led by British [50,62,63,95] and Italian [22,26,27,46,48,70,96] researchers. This distribution may be attributable to several factors, including a country’s built heritage, the sheer availability of buildings, and scientific developments. For examples, Italy (followed by Spain and the UK) is one of the countries with the largest built heritage in the world [75,76]. Tourism has been and continues to be one of Italy's fastest growing and most profitable economic sectors, with an estimated industry revenue of €136.1 billion [97], which may explain the economic necessity for cultural preservation. Moreover, of the 5,367,000 monuments registered in Europe, over 4,000,000 are located in Italy.

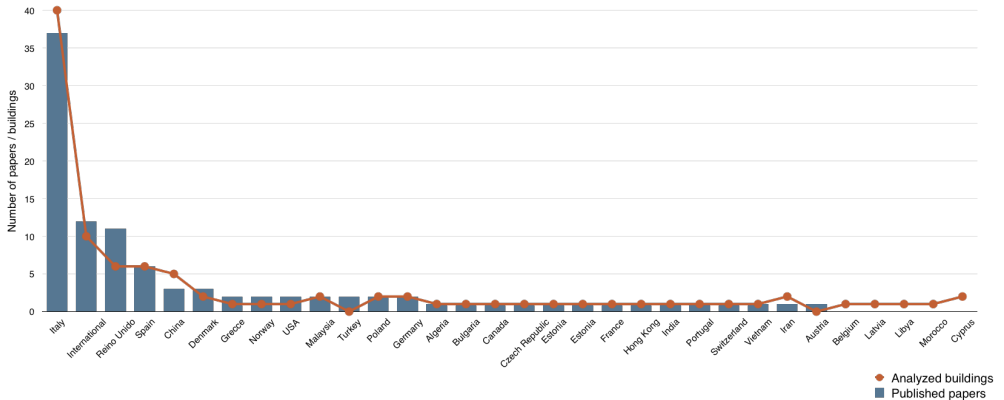


Figure 2. Analyzed buildings and published papers per countries. Blue bars represent the number of papers published in each country and the orange line represents the number of historic buildings analyzed.

2.2.3. Ages of the Historic Buildings Studied

Likely due to the difficulty of finding buildings preserved well enough for research and analysis, very few buildings built before the 12th century have been analyzed for purposes of energy efficiency research. As shown in Fig. 3, most research that has been conducted thus far has been on 20th century constructions. The disproportional interest in 20th century buildings is

partially attributable to less constricting preservation standards. Additionally, studying buildings from this period creates an immediate benefit. Since 20th century structures are often in use, efficiency and thermal comfort solutions are easy to implement and the buildings can therefore be quickly adapted to current needs.

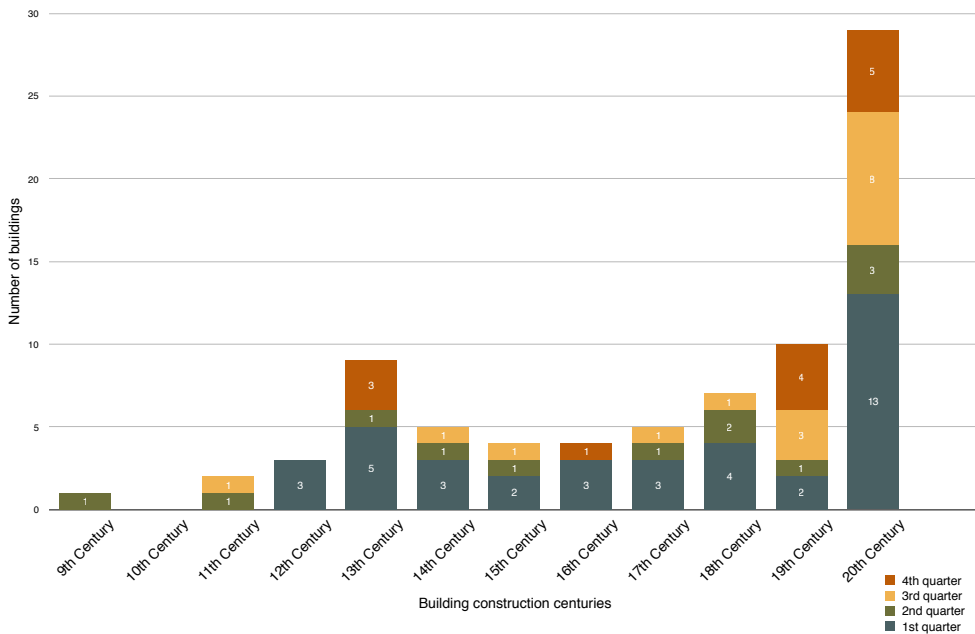


Figure 3. Ages of the buildings analyzed.

2.2.4. Literature Review Purposes

Investigations of historic buildings can have various goals, as highlighted in Fig 4. The main research objective has been to improve the energy efficiency and thermal comfort in historic buildings, and 72% of the studies have been conducted for this purpose. Many historic buildings, including churches and museums, house artwork. Consequently, 16% of investigations have aimed to conserve artwork and analyze internal conditions (temperature, humidity and air quality). The same analyses of indoor conditions, in addition to tests such as external wall performance analysis, have also been used in 4% of the studies.

Finally, 8% of the studies have had multiple objectives, including the development of rehabilitation methodologies and theoretical and statistical examinations of the energy performance of cities and neighborhoods.

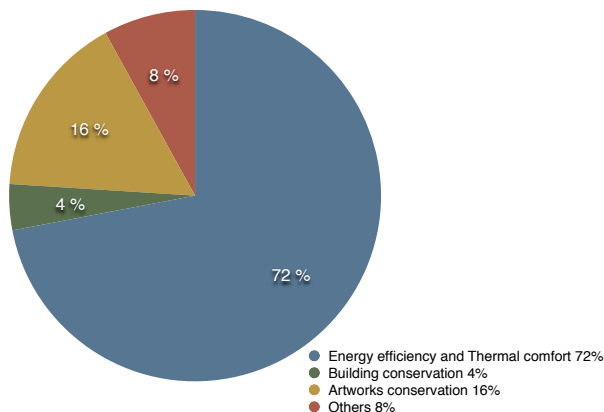


Figure 4. Research purposes in analyzed papers.

2.3. Type of Historic Buildings

Most of the studies conducted can be classified by the type of historic building analyzed. As shown in Fig. 5, most researchers (23%) analyzed residential buildings. Religious buildings (17%), museums, theaters or libraries (11%), academic and palaces (17%), and studies on urban areas, such as neighborhoods, cities or even entire countries (10%), were the focal points of most of the other studies. Finally, some investigations (23%) cannot not be subsumed in any other category and include theoretical analyses that proposed new methodologies for applying energy efficiency measures.

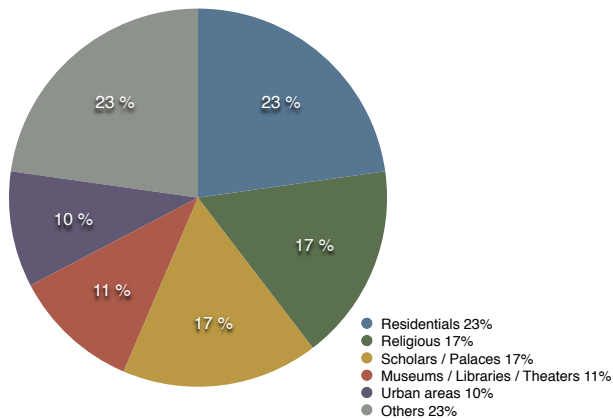


Figure 5. Building uses.

2.3.1. Residential Use

Historic residential buildings were the focal points of most of the investigations conducted on this topic. As depicted in Table 1, studies from the early 80’s focused on strategies for changing building use and rehabilitating rural structures. For example, in 1982, Theis [16] published a paper applying innovative design strategies to a historic hotel to improve its energy efficiency and to convert it to a multi-purpose commercial facility. Theis [16] and Jankovich and Pucetti [18] proposed to change the building use of abandoned historic rural structures through restoration. The latter researchers discussed improvement strategies for rural buildings using wind, water and solar energy systems for power generation and passive solar systems for heating and cooling.

Almost two decades later, other investigations analyzing residential structures began to emerge, with most papers published on the topic between 2001 and 2013. Many of these papers drew comparisons between energy performances of historic and modern buildings. As a case in point, Ealiwa et al. [25] compared warm weather thermal sensations in traditional buildings (with natural ventilation) with modern buildings (with air conditioning). Inhabitants’ surveys showed greater thermal comfort satisfaction in naturally-ventilated heritage buildings. Of the people surveyed, 39% more reported feeling neither hot nor cold in traditional buildings as compared with air-conditioned modern

buildings. Similarly, reports of hot sensations were 25% lower in traditional buildings. Indeed, according to Cantin et al. [98] (a field investigation made on eleven dwellings around France), some historic buildings perform better than new ones because ancient dwellings are interactive systems with bioclimatic properties more complex than modern dwellings with similar energy needs. The design and architectural elements of historic buildings therefore take into account climate, environmental and site conditions to maintain thermal comfort without mechanical systems. Another comparative study by Martín Ocaña et al. [23] demonstrated the utility of thermography in locating heat loss in different types of buildings, both modern and historic in Castillejo de Robledo, Spain. The field survey was carried out at sunrise and sunset in order to avoid solar radiation. The results showed that the technique used is especially beneficial for analyzing thermal inertia in traditional buildings and thermal losses in the modern ones. The most recent comparative investigations between modern and historic buildings were made by Li et al. [49,94]. These studies reaffirmed that historic buildings exhibit great performance in terms of energy efficiency and that the buildings analyzed consumed 28% less primary energy than modern buildings. Li et al.'s findings were confirmed by user surveys that showed a preference for thermal conditions within historic buildings.

Table 1.
Residential buildings studies.

Year of Publication	Researcher(s)	Origin of Researcher(s)	Location of Building(s)	Year of construction	Analysis techniques
2014	Moran et al.[87]	UK	UK	1810	Energy refurbishment Simulation
2014	Alev et al.[41]	Sweden, Finland & Estonia	Sweden & Finland	1700-1940	Simulation
2014	Arumägi & Kalamees[42]	Estonia	Estonia	1925	Monitoring
2014	Ben & Steemers[84]	UK	UK	1967	Simulation
2014	Fabbri et al.[75]	Italy	Italy	1959-70-85-	Simulation
2014	Khalili & Amindeldar[99]	Iran	Iran	95-	Monitoring
2014	Polo & Frontini[100]	Switzerland	Switzerland	1600-1900	-
2013	Li et al.[49]	China	China	1300	Surveys
2013	Moschella et al.[44]	Italy	Italy	-	-
2013	Pérez et al.[93]	Spain	Spain	1800	Energy refurbishment
2013	Kacher[101]	Algeria	Algeria	1600	-
2013	Stazi et al.[80]	Italy	Italy	1945-74	Monitoring
2012	Li et al.[94]	China	China	1300	Surveys
2012	Morelli et al.[40]	Denmark	Denmark	1896	Simulation
2011	Nguyen et al.[61]	Belgium & Vietnam	Vietnam	1900	Monitoring
2011	Omar & Syed-Fadzil[102]	Malaysia	Malaysia	1900	Monitoring
2010	Cantin et al.[98]	France	France	1400-1900	Monitoring
2010	Lucchi[77]	Italy	Italy	1963	Simulation
2004	Martín Ocaña et al.[23]	Spain	Spain	1890-1981	Thermography
2001	Ealiwa et al.[25]	UK	Libya	-	Surveys
1996	Tassiopoulou et al.[103]	Greece & UK	Greece	1750	Simulation
1983	Jankovich & Puncetti[18]	-	Italy	-	-
1982	Theis[16]	US	-	-	-

While some researchers were interested in comparative analyses between modern and historic residential buildings, others focused their work on comprehensive projects and on improving energy efficiency in residential units in different climates. For example, Alev et al. [41], Arumägi and Kalamees [42] and Morelli et al. [40] researched historic buildings in cold climates, such as the Baltic Sea region. Investigations by Fabbri et al. [75] and Lucchi [77], Pérez et al. [93], and Omar and Syed-Fadzil [102] focused on warmer climates such as Italy, Spain, and Malaysia, respectively.

Alev et al. [41] calculated energy use for different renovation measures based on varying scenarios (focusing for instance first on installations and then on thermal comfort improvements) through validated simulation models.

Results showed that improvements to building service systems and energy sources yield the most savings. Arumägi and Kalamees [42] analyzed the energy consumption and potential energy savings of historic wooden apartments in Estonia using field measurements, energy simulations and economic calculations. The refurbishment proposals, (based on different insulation measures), HVAC solutions and energy sources, achieved a primary energy consumption reductions between 20-65%. Morelli et al. [40] implemented three types of retrofitting measures in an old Danish multi-family building in order to reach a “nearly-zero” energy building standard. Changing insulation materials, a windows retrofit and the installation of a decentralized mechanical ventilation system with heat recovery were the three procedures these researchers used. As a result, Morelli et al. [40] achieved a 68% reduction in energy use and thereby fulfilled the legislative requirements for new Danish buildings.

As with cooler climates, warm conditions proved conducive to achieving high levels of energy savings. Khalili and Amildeldar [99], Kacher [101], and Nguyen et al. [61] demonstrated that warm environments are favorable to passive energy efficiency strategies. Through monitoring thermal indoor conditions, energy simulations, and CFD, these studies also confirmed that historic buildings exhibit great energy performance even when active comfort maintenance measures are not implemented.

Fabbri et al. [75] and Lucchi [77] also conducted their investigations in warmer climates. Fabbri et al. [75] created four energy retrofit simulations of a building in Italy. Each simulation calculated the building’s energy performance based on the thermo-physical parameters that the building would have had had it been constructed during different points in time (specifically in either 1950, 1970, 1985 or 1995). The results showed that technological improvements in construction do not create energy savings; the relationship between technological improvement and energy savings is not therefore linear. Lucchi [77] created a cost-effective approach to energy conservation through technology, rather than sacrificing comfort and convenience. She performed an exhaustive energy audit of an Italian neighborhood using thermography, environmental monitoring, mechanical analysis, user’s comfort analysis, and

energy modeling. In conclusion, Lucchi [77] prepared a handbook to educate the inhabitants about the appropriate maintenance, management and use techniques for the buildings they occupied.

In addition, research conducted in the UK, which has an oceanic climate, has also been very revealing. Using the Passivehouse standard as a reference in a building refurbishment, Moran et al. [87] reduced CO₂ emissions by 83% and increased energy savings by 55%. Also in the UK, Ben and Steemers [84] found that occupant behavior education resulted in an overall increase in energy savings between 62% and 86%. Based on their energy simulations study comparing an original and refurbished traditional dwelling in Athens and focusing on seasons rather than climates, Tassiopoulou et al. [103] concluded that it is necessary to evaluate thermal performance of historic buildings in both winter and summer seasons (especially when trying to restore a historic building for conservation and meeting the thermal requirements of current Building Regulations).

Focusing neither on comparative analyses nor on climactic factors, investigations by Polo and Frontini [100] and Moschella et al. [44] went a step further and resolved the problem of integrating solar thermal and photovoltaic panels with historic building frameworks.

Residential buildings were the subjects of 23% of the publications on energy efficiency and thermal comfort in historic buildings between 1982 and 2014. These studies primarily focused on buildings from the 20th, 19th and 14th centuries, which were generally located in Italy, UK, Spain and China. The large interest in structures from these periods and geographic locations can be attributed to physical accessibility and the owners' interests in making the buildings more efficient. Energy simulation, building monitoring and, to a smaller degree, thermal satisfaction surveys, have been the most popular techniques used to analyze residential buildings.

2.3.2. Religious Use

Investigations centered on religious buildings have been prevalent, with 17 papers dedicated to this use. As delineated in Table 2, the two oldest studies, from 1995 and 2000, analyzed internal thermal comfort in places of worship in India and Bulgaria, respectively. In 1995, Tiwari et al. [20] showed that an ancient building in India (mahal) achieved thermal comfort on its own with the use of natural ventilation. Energy balance equations for various building components were used to analyze energy performance. Results showed that the original placement of windows allowed for thermal comfort in the rooms of the mahal, which was superior to the comfort that could have been achieved with the types of installations used in modern buildings. Bernardi et al. [96] focused on thermo-hygrometrical parameters, including the analysis of the porosity of the stone, in a church in Bulgaria prior to the restoration of frescoes on its internal walls. Bernardi et al. concluded that, while the microclimatic conditions of the church were stable, soluble salts must be decreased prior to restoration.

Table 2.
Religious buildings' studies.

Year of Publication	Researcher(s)	Origin of Researcher(s)	Location of Building(s)	Year of construction	Analysis techniques
2014	Martins & Carlos[57]	Portugal	Portugal	1653	Monitoring
2014	Woroniak & Piotrowska-Woroniak[56]	Poland	Poland	1890-1902	Energy refurbishment
2014	Martínez-Garrido et al.[92]	Spain	Spain	1200	Monitoring
2014	D'Agostino & Congedo[73]	Italy	Italy	1114	CFD
2014	Varas-Muriel et al.[58]	Spain	Spain	1931	Monitoring
2013	Bernardi et al.[48]	Italy & Spain	Italy	1294	Monitoring
2013	D'Agostino et al.[55]	Italy	Italy	1114	CFD
2013	Maahsen-Milan & Fabbri[54]	Italy	Italy	1600	-
2010	Camuffo et al.[70]	Italy, Finland & Poland	Italy	1350-1450	CFD
2009	Balocco & Grazzini[67]	Italy	Italy	1500	CFD
2008	Balocco & Calzolari[66]	Italy	Italy	1232	Simulation
2007	Samek et al.[33]	Poland & Belgium	Poland	1736	Monitoring
2007	Bencs et al.[32]	Belgium, Hungary & Netherlands	Italy	1400	Monitoring
2006	Loupa et al.[31]	Greece	Cyprus	850-1650	Monitoring
2005	Cataldo et al.[81]	Italy	Italy	1068	Monitoring
2000	Bernardi et al.[96]	Italy & Bulgaria	Bulgaria	1200	Monitoring
1995	Tiwari et al.[20]	India	India	1050	Monitoring

More recent studies have also contemplated thermal comfort and have monitored the inner temperatures and relative humidity levels. Loupa et al. [31] presented the results from two medieval churches in Cyprus and showed that the fluctuations in indoor temperatures, humidity levels, and levels of pollutants exceeded the recommended values. With the use of two networks of wireless sensors (one to measure the external weather conditions and the other for indoor temperature and humidity monitoring), Martínez-Garrido et al. [92] analyzed the differences in humidity levels along the walls and various heights of a church in Spain. The results showed that a longer thermal lag in particular wall areas contributed to indoor thermal comfort by releasing at night the heat absorbed during the day. Varas-Muriel et al. [58] designed and used a 3D sensor network to measure heat variances in a church in Talamanca de Jarama, Spain.

The researchers concluded that traditional heating methods worked to accumulate heat in the upper levels of a church while retaining cold air at pew height. The rift between ideals and reality was discussed by Martins and Carlos [57], who showed the difficulty of maintaining temperature control and obtaining ideal levels of thermal performance in a convent in Lisbon. In order to assess energy performance, the investigators carried out an external walls analysis test with interior surface data loggers. Consequently, the examination revealed that during the summer months, the external walls worked well to reduce the heat flow into the building and the indoor temperature and humidity levels were thus stable. During the winter months, however, the walls alone could not have been relied on for thermal comfort. The researchers therefore established that additional actions, such as double-glazing the windows and improving heat gains on the south façade, should be taken to ensure the covenant's thermal comfort in the winter.

Shifting from thermal comfort assessments, heating systems in religious buildings have been of great interest to several researchers. One investigation, conducted by Woroniak & Piotrowska-Woroniak [56], focused on how adding insulation and replacing old windows and doors can result in a reduction in energy demand and, consequently, consumption. This paper presented the environmental and the energy effects that can be achieved with the thermomodernization of churches and by upgrading both the heating systems and the heat sources. In totality, the results suggested that energy refurbishment of the buildings as well as the modernization of the heat sources and the central heating systems is economically and environmentally justified. Maahsen-Milan and Fabbri et al. [54] examined the HVAC typologies in two refurbished buildings in Italy in order to propose a methodology for restoration and retrofitting projects focused on installations. Continuing with the HVAC systems research line, several papers analyzed different heating systems in churches [32,33,70]. Bencs et al. [32] studied the effects of a conventional hot-air heating as compared to a new system based on low temperature heating elements in the pews and carpets on the artworks in a church in Italy. The indoor air monitoring data revealed that the installation of the new heating

system in the pews and carpet rendered the old system obsolete. Moreover, the new heating system transported a lower amount of pollutants and thereby reduced the chemical hazard to the works of art. Finally, the users' thermal comfort was improved because the heat and moisture was kept at and around the benches. Samek et al. [33] also monitored the indoor microclimate of a church (in Poland) to calculate the impact of a new heating system (overhead radiant heaters). The results showed that the new system allowed for a controlled delivery of heat to the particular areas where the people worshiped; the paintings were not negatively affected. Camuffo et al. [70] proposed a very similar strategy as the last two papers discussed and directed heat from radiators right to the pew area while leaving the indoor conditions of the church practically unaltered. This system was thereafter monitored for 3 years and the results showed that the pew-directed heating solution caused a significant betterment in thermal comfort and preservation of artwork. Moreover, the results of this study were included in three draft standards of the European Committee for Standardization created to control the environments of cultural heritage goods [70].

Also focusing on indoor climate controls, three papers presented results gathered with a Computational Fluid-Dynamics (CFDs) to show ventilation strategies for a crypt [55] and natural ventilation [67,73] in historic buildings. D'Agostino et al. [55] simulated the ventilation of the Crypt of Lecce Cathedral (Italy) using CFD tools. After the results of the model were confirmed by surveyed data, the researchers concluded that CFD calculations are very useful for predicting future indoor conditions. The investigators thereafter proposed that, to improve the Crypt's microclimate, users should refrain from opening all windows at the same time. In fact, ideally, to maintain the perfect conditions for the artworks, the windows should remain closed. Balocco and Grazzini [67] explored the velocity and air temperature distributions and the airflow patterns within a religious building in Italy. The scholars created a 3D model to use alongside the CFD tool to validate the results of the latter with the monitored data from the former. The researchers confirmed that ancient natural ventilation systems work well and create stable and comfortable internal

microclimatic environments even in high temperatures and with solar radiation fluctuations. In their study, D'Agostino and Congedo [73] built on the methodology of the previous paper discussed and used 20 3D models together with CFD tools and five ventilation scenarios to analyze a church in Italy. The goal of this investigation was to find a solution that allowed for the creation of the optimal indoor microclimate for building preservation. The researchers were thus able to determine the optimal utilization scheme for the existing windows and door to achieve the desired interior conditions.

Different indoor conditions, such as natural lighting and air quality, were analyzed in investigations by Balocco and Calzolari [66] and Cataldo et al. [81], respectively. Balocco and Calzolari [66] ran a natural lighting design research in a medieval church in Florence, Italy. A solar radiation control, two light shelves, a skylight and two light pipes were installed in the building with no substantial modifications. Results showed that the installations ensured energy savings for cooling and lighting and as well as guaranteeing users' lighting comfort. Cataldo et al. [81] studied air quality in a building with deteriorating cultural heritage by integrating different non-destructive methods, such as microclimatic and ground penetrating radars. Together, the two papers pointed out the importance of integrating data about cultural heritage while making effectual decisions pertaining to heritage safeguards. Bernardi et al. [48] showed the efficacy of phase change materials when used as thermal energy storage units in heritage buildings. The study revealed, however, that direct contact between phase change materials and heritage objects is not recommended, as mechanical damage could result.

Overall, 17% of the published papers, up to and including the year 2014, analyzed energy efficiency and thermal comfort in religious buildings. Most of the religious constructions examined are located in Europe and more than half in Italy. The large interest in this building type can be attributed to the wide prevalence of these structures and easy access to them. Researchers, mainly Italian, Spanish, Polish and Greek, studied religious buildings from different periods ranging from the 9th to the 20th centuries; although, the most commonly-analyzed buildings were from 13th and 17th centuries. While the

studies did focused much on energy rehabilitation projects, probably due to the complexity of implementing energy efficient measures, a new line of investigation had appeared and artwork preservation within religious building became a highly sought-after endeavor. To this end, monitoring techniques for indoor environmental pollutants, analyses of ventilation systems, and indoor CFD simulations were developed and used as a result of these studies.

2.3.3. Academic and Palace Use

The palaces that have been analyzed are few and restricted to the following Italian locations: Benevento [104], Palermo [30], Florence [65,68] and Turin [72]. According to the present Italian energy legislation, historic buildings are excluded from energy refurbishment obligations (University, Agencies, Museums, etc.) [104] (Table 3).

Ascione et al. [104] had proposed a multi-criteria approach for the energy refurbishment of protected buildings and various retrofit actions had been verified and tested using simulation software to ascertain the energy performance effectiveness and economic feasibility of the building. The techniques were subsequently applied to a Palazzo dell'Aquila Bosco-Lucarelli in Southern Italy. It was thereafter determined that the energy refurbishment of this palace had the potential of providing a primary energy savings of around 22%. The researchers pointed out, however, that the adoption of the proposed energy efficiency measures would only been justifiable if the interventions left the historic and cultural identity of the building untouched. Following the same research line, Costanzo et al. [30] monitored the indoor climatic conditions of a palace in Italy in order to correctly preserve the artwork it housed. The investigators thereby evaluated whether thermo-hygrometric values in the palace's interior met indoor comfort standards and concluded that it was necessary to install an air-conditioning system and to run it continuously in summer and winter seasons.

Table 3.
Scholar and Palace buildings' studies.

Year of Publication	Researcher(s)	Origin of Researcher(s)	Location of Building(s)	Year of construction	Analysis techniques
2014	Buvik et al.[52]	Norway	Norway	1914	Energy refurbishment Simulation
2014	Sauchelli et al.[51]	Italy	Italy	1960	Energy refurbishment Simulation
2014	Erhorn-Kluttig & Erhorn[105]	Germany	-		Energy refurbishment Monitoring & Energy refurbishment
2014	Zinzi et al.[83]	Italy	Italy	1965	Energy refurbishment Simulation
2014	Mørck & Paulsen[106]	Denmark	-		Energy refurbishment & Simulation
2014	Santoli et al.[53]	Italy	Italy	-	Energy refurbishment CFD
2013	Corgnati & Perino[72]	Italy	Italy	1718	Monitoring
2011	Ascione et al.[104]	Italy	Italy	1520	Monitoring
2011	Lagüela et al.[107]	Spain	Spain	1930	Thermography
2010	Boarin[108]	Italy	Italy	-	Energy refurbishment Simulation
2007	Balocco[65]	Italy	Italy	1299	Simulation
2007	Balocco & Grazzini[68]	Italy	Italy	1299	CFD
2006	Costanzo et al.[30]	Italy	Italy	1300	Monitoring
2004	Camuffo et al.[82]	Italy	Italy	1374	Monitoring
2002	Hanna[29]	UK	UK	1900	Monitoring
1985	Butera et al.[19]	Italy	Italy	-	Simulation

Using a CFD software program (an advanced fluid-dynamic investigation tool) to run a transient conditions simulation, Balocco [65] created a 3D model that analyzed temperature and vapor concentration distributions, which have resulted from natural convection, fan coils systems and human presence. The goal of the study was to analyze a palace in Italy for a future refurbishment project. The building's structure was determined to have been conducive to the desirable indoor environmental conditions. Additionally, the control of thermal, hygrometric, and pollutant and thermal loads proved to add further benefit and guaranteed the appropriate environment for artwork conservation. Balocco and Grazzini [68] proposed a plant refurbishment in a palace in Italy by installing a mobile platform on the existing floor with a modular heating installation. CFD tools were used to simulate the energy performance of this solution and the results were also validated with experimental data. The refurbishment solution proved to be fully compatible with the palace and the microclimatic indoor conditions were also not significantly altered by the new installation. Corgnati

and Perino [72] used CFD in order to optimize the ventilation strategy and the air distribution in a palace in Turin, Italy. CFD techniques were used in this study to assess and forecast the indoor microclimatic conditions and the simulations showed that the proposed HVAC refurbishments would render the palace suitable to host exhibitions.

Studies from the early 80's focused on strategies for rehabilitating school buildings. In their 1985 publication, Butera et al. [19] included energy conservation measures in the rehabilitation program of an ancient school buildings in Palermo (Italy). The research showed that, because of the building characteristics, occupation patterns and a mild climate, the most cost-effective refurbishment option was a properly-controlled heating system. Most of the studies pertaining to academic use, however, emerged between 2002 and 2014. These studies showed that energy simulation plays an essential role in analyzing the performance of retrofit measures. Since the effects of a single retrofitting measure cannot be isolated, many studies analyzed the combined effects of proposed intervention methods. For example, Sauchelli et al. [51] created a validated energy model that demonstrated a potential reductions in the heating demand (by 70%) and heating power (by 33%) in response to the implementation of passive solutions, such as new windows and thermal insulation.

The combination of metric information from a terrestrial laser scanner and thermal information from the thermographic camera has demonstrated the utility of thermography in locating heat loss in different types of buildings, both modern and historic. This method has not only given researchers a higher level of knowledge of the object examined, but has also allowed for quantification of the thermal studies if the clouds of points are texturized with thermographies. Lagüela et al. [107] utilized this approach and combined thermography with laser data to analyze a school in Vigo, Spain.

Research conducted on an existing high school building, in response to the European Directive 2010/31/UE (which promotes the construction of Nearly Zero-Energy Building expected from 2019), was also very revealing. In

combination with active strategies and with the integration of photovoltaic panels, the overall energy need of the building was reduced to nearly zero. A potential energy demand reduction of 70% was also obtained with the passive solutions proposed. To test the different proposed scenarios and analyze the benefits in terms of energy consumption, dynamic energetic simulations were conducted using Trnsys 16 (Transient Simulation Tool) [51].

Santoli et al. [53] assessed public schools in Rome (Italy) in order to define possible intervention strategies for reducing energy consumption. This study proposed a complete evaluation of solutions useful for quantifying resources necessary to start the process of urban energy regeneration. Several standard interventions were defined according to the historic and architectural characteristics of the buildings. The analysis was performed using a simple Payback Time Analysis (PBT), which identified priorities for action by comparing the costs parameterized for standard retrofit interventions for the existing envelopes and systems with the benefits achievable through energy and cost-saving interventions. Hanna's [29] research evaluated and quantified daylight, acoustics and thermal comfort in the Glasgow School of Art and compared the actual measurements to the subjective perceptions of the patrons and visitors. Results showed that there is no relationship between levels of daylight (when daylight was raised above or lowered below the recommended standards) and the visual discomfort of occupants. Additionally, the users' surveys revealed that living in a historical building is a matter of great importance for almost all occupants. Following the same line of research, Boarin [108] demonstrated that operating effectively and in a scheduled way on existing school buildings (by adapting the physical environment and optimizing the use of resources) not only increases the quality of construction and occupants' comfort, but also improves the local entities' ability to manage economic resources.

Finally, "School of the Future" was an international project within the 7th Framework Program of the European Union. The core of this project was to realize the retrofit demonstration projects of four school buildings in four different European countries: (Germany [105], Italy [83], Denmark [106] and

Norway [52]), which represent most of the climate conditions in Europe. The objective of this work was to develop an overview of the available building and system retrofit technologies for energy efficient school buildings, including the impact on the energy performance, indoor environment quality, and economic feasibility. Various measures were assessed, covering the following topics: reduction of heat losses from the building envelope; optimal handling of solar gains, heating, cooling, ventilation and lighting systems; and energy supply/generation systems.

Historic buildings dedicated to academic and palace use have had the lowest number of investigations dedicated to them. This is likely because, compared with other building types, academic buildings and palaces are restricted in the flexibility of their use and design and are therefore not as accessible as other structures. Most publications analyzed Italian structures (80%), were led by Italian investigators (67%), and examined buildings from the 13th, 14th and 20th centuries.

2.3.4. Museum, Library and Theater Use

Table 4 below outlines studies from the early 80's that were focused on assessing the energy conservation possibilities in museums, libraries and theaters. Most of the studies analyzing museums for energy conservation purposes were published between 1999 and 2014; however, interest in the topic appeared as early as 1983.

In their publication, Ucar et al. [17] outlined the special environmental needs of museums and historic buildings that can be met through the methods that also conserve energy. The irreplaceable nature of museum collections and the historic structures that they often house mandates superior care and the elimination of any irreversible damage in the process of saving energy. Ucar et al. [17] summarized heating, cooling and humidity control guidelines that should be followed and recommended that all such buildings have an energy audit performed on their facilities. Later studies showed that humidity plays an essential role and can compromise the life of the building envelope and the artifacts within it [21,28], as significant variations in humidity are not desirable

for preservation. Saïd et al. [21] reached this conclusion by monitoring indoor environmental conditions in a museum in Ottawa, Canada. Similarly, Pavlogeorgatos [28] found that, together with humidity and pollution, temperature in exhibition rooms and storage areas is one of the most important factors causing artwork deterioration. He explained all the possible hazards for cultural goods that must to be controlled in a museum for the proper preservation of heritage items.

Table 4.
Museum, Library and Theater buildings' studies.

Year of Publication	Researcher(s)	Origin of Researcher(s)	Location of Building(s)	Year of construction	Analysis techniques
2014	Fabbri & Pretelli[74]	Italy	Italy	1454	Monitoring
2014	Polo & Frontini[100]	Switzerland	Switzerland	1600-1900	-
2014	Wang et al.[89]	UK	UK	1855	Simulation & Energy refurbishment
2012	Farreny et al.[91]	Spain	Spain	-	-
2011	Maahsen-Milan & Simonetti[78]	Italy	Italy	1700-1900	-
2009	Corgnati et al.[34]	Italy	Italy	-	CFD
2004	Gysels et al.[26]	Belgium, Italy & Austria	Belgium	1873	Monitoring
2003	Pavlogeorgatos[28]	Greece	-	-	-
2001	Camuffo[27]	Italy, Belgium, Austria, UK & New Zealand	Europe	1500	Monitoring
1999	Saïd et al.[21]	Canada	Canada	1878	Monitoring & Thermography
1999	Camuffo et al.[22]	Italy	Italy	1582	Monitoring
1983	Ucar et al.[17]	-	-	-	-

Due to the variety of the works of art housed in museums and the array of the materials that comprise them, microclimate control for cultural heritage must be given particular care. A methodology for microclimatic qualification assessment is described in Corgnati et al.'s [34] study, which is based on medium/long field monitoring of environmental parameters and a microclimatic quality evaluation expressed by the "Performance Indicator". Consequently, the researchers demonstrated that heating and air conditioning systems, when chiefly designed for human welfare, are not suitable for building conservation and can cause unfavorable temperature and humidity fluctuations [22,27].

Camuffo et al. [22] ran a summer and winter field investigation of the indoor microclimate of a museum in Venice, Italy, especially focusing on the influence of heating and cooling systems. It was determined that pollutants were more prevalent during the summer, as windows and doors are more frequently opened at that time. Camuffo et al. [27] likewise studied the microclimates, the air pollution levels, and the biological contaminations within four museums around Europe in order to propose improvement techniques.

Focusing more on the building exterior, Maahsen-Milan & Simonetti [78] studied three cases of architectural and historic quality (Torino, Italy) and found a strategy for reducing energy costs and guaranteeing comfort and sustainability through various replacement interventions paid for by management bodies. (Due to high management costs, energy retrofitting was the choice for improving the building energy class.) The study also suggested improving performance of envelopes, installations and new enlargements in order to reach optimal energy efficiency and thermal comfort levels. Wang et al. [89], using both measured and modeling data, analyzed the hygrothermal environment in a national gallery. The simulations ran several cases to test a number of low energy solutions proposed in a gallery renovation project in order to reduce the energy consumption with no cost to the quality of environmental control. These options included three types of glazing for the skylights, two ways of insulating the timber roof structure, and adaptive environmental controls. Results showed that, a 28% increase in energy savings could be reached by improving the glazing and another 20% increase in savings by adding roof insulations. The article concluded that a combination of all suggested solutions could have potentially resulted in a 60% energy consumption reduction. With the same objective of measuring and lowering energy consumption, Farreny et al. [91] analyzed the energy profile of 28 museums in Spain and found a correlation between water and energy consumption and the services the buildings provided. The relevant factors included building size, the rate of activity, and the number of visits and hours of operation.

Twelve articles, focused on libraries, museums and theaters, have been published and discussed in this section. Again, all of the buildings examined are

located in Europe and most in Italy. Since these buildings often house artworks, books and documents that require special conditions for conservation, several studies have focused on analyzing indoor air quality. In addition to the variety of the in-house materials, the lack of homogeneous and consistent distribution of heat and vapor in space, which causes changes in air temperature and relative humidity. For these reasons, technical standards and regulations are essential for assessing the optimal values of the physical parameters in exhibition spaces [34]. An interesting approach to tackle this problem has been the development of maps of indoor microclimatic conditions (spatial distribution of relative humidity, temperature, air velocity, etc.) [19,95] using modeling software.

2.3.5. Urban Areas

As Table 5 shows, Italian neighborhoods were the topics of most of the research conducted on buildings in urban areas. Three of the studies focused on extensive refurbishment projects of the respective urban areas. First, Cardinale et al. [45] performed an experimental study of vernacular architecture in Southern Italy. External environmental climatic parameters were monitored (temperature, relative humidity and air velocity) for various periods of the year, for an average duration between 12 and 15 days for each season. A simulation of the energy behaviors of the structures was then performed using the DesignBuilder/EnergyPlus software and the results thereafter validated by comparing the measured and simulated data and calculating the Inequality Coefficient. This analysis proved to be very effective for artistic and historic structures. The results indicated that, despite high thermal transmittance values of the walls, top-level indoor comfort could be reached using simple heating systems during the cold season.

De Berardinis et al. [46] pointed out the need for increasing the energy efficiency of heritage buildings in the Italian region of Abruzzo, which withstood considerable damage as a result of the 2009 earthquake. The destruction caused by this natural disaster led to a series of interventions including those aimed at improving energy efficiency. Researchers conducted

on-site investigations to assess the feasibility of possible solutions. For example, thermal measurements, such as thermography testing and posterior thermo-flux-meter analysis, were taken. The data from these tests showed better thermal transmittance than expected from literature. A series of dynamic simulations were also performed using the DesignBuilder software. Finally, different solutions for improving energy efficiency were compared using a methodology based on a “case by case” approach that respected the peculiarities of each context. The research therefore showed that an earthquake could serve as an opportunity to propose building rehabilitation aimed at strengthening energy performance. Authors concluded that applying the proposed energy solutions for damaged masonry buildings could improve their energy performance by over 50%.

The third study analyzing refurbishment projects was conducted by Bonomo and De Berardinis [47] who reported the implementation criteria for installing Photovoltaic (PV) solar panels in a historic settlement near L’Aquila, Italy, which were being refurbished after the 2009 earthquake. A simulation model with integrated PV was run and the settlement reached the Nearly-Zero Energy Settlement standard, thereby fulfilling the total energy demand using only solar energy. A field survey was also carried out on-site to monitor temperature and humidity using analysis techniques like thermography. Using the gathered data, the researchers compiled a list of interventions capable of achieving energy performance improvements of over 50%. Similar to De Berardinis et al. [46], the earthquake in this investigation gave researchers an opportunity to renovate destroyed ancient structures while simultaneously increasing the efficiency of the buildings.

Table 5.
Urban areas' studies.

Year of Publication	Researcher(s)	Origin of Researcher(s)	Location of Building(s)	Year of construction	Analysis techniques
2014	Bonomo & De Berardinis[47]	Italy	Italy	1200-1700	-
2014	Tang et al.[50]	China & UK	China	-	CFD
2014	De Berardinis et al.[46]	Italy & Canada	Italy	-	Thermography, Energy refurbishment & Monitoring
2013	Cardinale et al.[45]	Italy	Italy	1200	Simulation
2013	Wu & Xu[43]	China	China	-	-
2012	Fabbri et al.[76]	Italy	Italy	-	-
2012	Tang et al.[62]	China, UK & Germany	China	-	CFD
2012	Tagliabue et al.[39]	Italy	Italy	-	Simulation & Energy refurbishment
2012	Moran et al.[88]	UK	UK	1919	-
2011	Boeri et al.[69]	Italy	Italy	1966	Surveys, Simulation & Energy refurbishment

Tagliabue et al. [39] were less concerned with general refurbishment project and focused on redeveloping economically distressed areas by applying modern retrofitting to decayed buildings situated in historic locations. Specifically, this research analyzed methods by which Palazzolo Acreide, a UNESCO Heritage site in Sicily, Italy, can be converted into a “Spread Hotel”. Tagliabue et al. [39] found that installing solar panels to power HVAC systems improved energy performance and was an effective way to preserve local heritage characteristics while renovating unused buildings. The results yielded an energy consumption reduction of 76% over 5 years.

Fabbri et al. [76] considered the problem of finding an evaluation and measurement tool for a town’s energy consumption that takes into account the age and the characteristics of existing buildings. The study was performed in Ferrara (a city located in the northeaster part of Italy) and focused on a historic city center. A database of Energy Performance Certificates (EPC) was taken for the purpose of analyzing the energy class rating distribution for Ferrara city and its historic center. The Zone Energy Indicator (ZEI), which is a ratio between energy consumption and the sum of urban units, was found to be a useful tool for understanding the energy incidence of urban density and building typologies.

A map project of EPC energy class was also performed with Geographical Information System (GIS).

Boeri et al.'s [69] research aimed at developing intervention strategies that could curb the feelings of disorientation and social dissatisfaction of Pilastro's residents—a high-density social housing settlement in Bologna, Italy. The investigation focused on identifying those factors that affect the self-image of a large urban neighborhood. While the original hypothesis supposed that physical marginalization was the reason for low morale, the study results showed that dissatisfactions stemmed from factors such as deteriorating buildings that were either underutilized or used improperly.

Shifting the focus to Asia, Tang et al. [50] were concerned with sustainable design and planning of historic Chinese settlements. Following the interest that was initiated by a previous work [62], a simulation model was built using the thermal environment and wind patterns of a village in the central-western region of China. The study considered the usefulness of traditional bioclimatic design concepts and techniques and found that the construction style allowed for the creation of modern bioclimatic human environments. Wu & Xu's [43] research aimed at predicting energy consumption and CO₂ emissions of a world heritage area in China between the years 2010 and 2020. To address uncertainties and to optimize the parameters of the system, a fuzzy multiple objective programming model was used. The study results showed that energy consumption and CO₂ emissions increased dramatically in response to rapid economic growth.

Back in Europe, Moran et al. [88] compared energy use data collected from 102 homes built before 1919 in Bath, UK—one of the only two complete cities with World Heritage status. The researchers were troubled by the lack of reliable data available to policy makers concerning the energy performance of historic buildings. The findings suggested that energy use in historic dwellings in Bath is lower than the national and regional averages. Moreover, Moran et al. [88] provided a statistically representative baseline that can now be used to

assess district scale retrofits designed to reduce energy consumption and carbon emissions.

The articles about urban areas are very recent and were all published between 2011 and 2014. Neighborhoods and towns that were investigated are primarily from the 20th, 18th and 13th centuries, and the Italian structures (followed by Chinese and British) have again been the most studied. Since these investigations were conducted on groups of buildings, the studies have had different objectives than the ones described in previous sections in this paper. Mainly, researchers concerned with this building use analyzed CO₂ emissions, considered an economic point of view, the challenge of efficient urban planning, and the relationship between settlements and the environment they are in.

2.3.6. Other Uses

Papers that cannot be grouped into any of the previously-described uses are discussed in this section (Table 6). One of the oldest studies found through this investigation dates to a 1978 publication by Prömmel [14]. Prömmel [14] presented basic concepts of thermal insulation and heating systems performance. Just two years later, Johnsen [15] published a paper reviewing experimental projects. These projects had applied energy-savings measures in existing buildings, reviewed methods for improving the building envelope, implemented building services systems and automatic controls, designed low energy consumption systems, and created experimental low energy buildings and methods for evaluating energy-saving techniques.

Prömmel and Johnsen were harbingers of energy efficiency and thermal comfort in historic buildings research. Their efforts were followed by publications focused on comparing the then-current energy expenditures of historic buildings to their future potential. For example, in Hong-Kong, Yung and Chan [38] reviewed literature about the factors that help achieve sustainable development in the preservation of historical buildings. The investigators made the claim that reusing historic buildings contributes to the overall decrease in carbon levels of a city. Subsequently, Troi [11] collected important data from buildings built before 1919 and between 1919 and 1945. Based on various

statistics gathered from European reports and other investigations, Troi [11] compared the actual energy efficiency performances of those buildings to the theoretical performances predicted by energy efficiency interventions. All results were statistically calculated and showed that interventions will reduce CO₂ emissions by around 180Mt by 2050 and will thereby increase indoor thermal comfort and enhance the long-term conservation and sustainable management of our cities. Cardinale [36] compared an excavated building to a built vernacular construction in the Mediterranean by using current standards mandated by Italian legislation. The excavated building was found to have performed better than the regular one. Finally, Ozay's research [59] in northern Cyprus analyzed the responsive climatic behavior of traditional constructions throughout history. This study discussed societal and climatic influences on vernacular architecture and architecture from the Ottoman, British and modern periods.

Following the vernacular architecture research path, Hatamipour and Abedi [109] made an exhaustive collection of traditional passive construction techniques that cool buildings in hot and humid climates in Busherhr, Iran. The building techniques implemented, such as light colored buildings, wooden roofs and building shades, applied basic principles that can still be used today as passive cooling measures. Zhai and Previtali [110] conducted a study about the energy performances of vernacular buildings built in different environments utilizing various traditional construction techniques. These buildings were then compared against the rules established by the International Energy Conservation Code (IECC). The results showed that vernacular building techniques are still current and must be taken into account while designing modern buildings in order to optimize energy performance.

Godwin [85] conducted a comprehensive research and explained in detail the main factors to consider while trying to optimize the energy performance of a historic building. He also expounded some examples of refurbished energy efficient buildings with great heritage values. Ward and Choudhary [90] and Cardinale et al. [71] conducted other researches with similar purposes. Their studies were based on deep building analyses and precise energy retrofit

projects. Ward and Choudhary [90] examined two buildings in The Royal Botanic Gardens in Kew, United Kingdom, while Cardinale et al. [71] studied two vernacular buildings in Matera and Alberobello, Italy. Ward and Choudhary [90] developed an energy retrofit methodology using simulation tools and discussed the potential for onsite generation and supply of energy. In addition to a less than 5-year payback for the installation, the analysis exhibited a 47% reduction in CO₂ emissions and an energy consumption savings of over 40%. Frequently, comprehensive investigations have focused on improving the building envelopes; however, there are also studies, such as the one conducted by Buhagiar et al. [95], which analyzed other building elements. Buhagiar et al. [95] measured the internal thermal mass, added an intermediate floor, scooped out the walls, added insulated indoor fabric and partitioning to optimize energy performance.

Insulating building envelopes has proved effective for achieving optimal energy levels. Zagorskas et al. [37] developed an exhaustive study of external walls based on thermal transmittance and humidity. Taking that analysis and some other data as a basis, this study analyzed energy performance of five external walls composed of five different insulation materials and thicknesses in order to reach the optimal solution. In fact, choosing the optimal insulation materials for historic building envelopes has been a topic of interest among other researchers. Sterflinger et al. [111] compared the biological susceptibility of organic insulation materials that were developed in a laboratory and installed in historic buildings. From a microbiological point of view, the research revealed that plaster and board made of perlite were the most suitable materials for thermal insulation. Furthermore, Grinzato et al. [24] ran an investigation on Infrared (IR) thermography to analyze the thermal properties of porous materials. In this study, specific thermal models were used to optimize the transient or quasi-stationary testing procedure using the Arsenal of Venice as a case study. IR thermography allowed the investigators to achieve a deeper knowledge of building conservation. The authors predicted that their technique would be utilized for future indoor microclimate analyses; this insight was accurate and the method has been used by other investigators.

Among the different methods of studying and analyzing thermal performance of historic buildings, user surveys (the collection of subjective indoor thermal comfort perceptions) have been popular among researchers. In this research line, studies, such as the one by Kamaruzzaman et al. [63] in Malaysia, used a thermal satisfaction survey to assess occupants' opinions pertaining to the Indoor Environmental Quality (IEQ) of six different buildings. The results showed that lighting satisfaction, for example, depends on parameters such as the building type and inhabitants' age, gender and occupation. Sibley and Sibley [60] conducted an investigational project on two commercial buildings used primarily as a public bathhouses, or Hammams. Sibley and Sibley [60] installed uniquely designed glass domes to replace the thick bulbs that covered the many orifices in the roofs of the Hammams. Additionally, solar panels were installed to power LED lights, which not only allowed the bathhouses to remain operational after sunset, but also curbed energy expenditure. As in Kamaruzzaman et al.'s [63] research, Sibley and Sibley's [60] determination of the effectiveness of the measures was based on the result of subjective surveys of lighting comfort; the measures improved the quality and quantity of daylight and allowed the Hammams to be used throughout the day. Focusing only on historic building installations, Pretelli et al. [79] developed a methodology for restoring the original fixings in heritage buildings. The aim of this study was not only to improve the energy efficiency of the systems, but also to keep the buildings in use and to preserve the installations as integral parts of the building's cultural value.

Artwork preservation has continued to be a topic of interest for researchers even when the buildings that housed the artworks were not necessarily museums, theaters, or libraries. Zítek and Vyhliđal [35] proposed new humidity control techniques based on the application of sorption phenomena models of a castle in Czech Republic. Rather than focusing on annual temperature variations, Zítek and Vyhliđal [35] stabilized the moisture content in artistic works and historic exhibits by adjusting the interior air humidity. Lankester and Brimblecombe [86] modeled future indoor environmental conditions in seven different historic rooms, including private rooms, holding artwork throughout

Europe. This study used statistical regression to predict future climatic conditions in order to avoid paper degeneration and to create a standard for good practices. Johansson et al. [64] and Abuku et al. [112] focused on preservation of the building itself rather than the internal environment immediately surrounds the artworks. Johansson et al. [64] investigated the hygrothermal performance of a brick wall of a brewery with wooden beam-ends after its interior was insulated with vacuum insulation panels. By running numerical simulations, Abuku et al. [112] analyzed the impact of wind-driven rain on the hygrothermal response, mold growth at interior wall surfaces, indoor climate and energy consumption.

The investigations discussed in this section are very diverse in terms of building typologies, methodologies, and general objectives. British researchers (25%), followed by Italians (21%), have taken the lead on this research. Nevertheless, most of the buildings analyzed are located on Italian (26%), rather than UK (11%) territory. The papers range from publications comparing the energy performance of vernacular and modern buildings to preservation of buildings and artworks. Although the goals of these studies were different from the ones described in the particular building uses, the techniques are nearly identical, and energy simulation and CFD, thermography and PV-panel integration were the most commonplace procedures.

Table 6.
Other uses' studies.

Year of Publication	Researcher(s)	Origin of Researcher(s)	Location of Building(s)	Year of construction	Analysis techniques
2014	Johansson et al.[64]	Sweden & Norway	-	1900	-
2014	Zagorskas et al.[37]	Lithuania & Latvia	Latvia	-	-
2014	Ward & Choudhary[90]	UK	UK	1759	CFD, Simulation & Energy refurbishment
2013	Cardinale et al.[36]	Italy	Italy	-	-
2013	Fabbri[7]	Italy	Italy	-	-
2013	Sterflinger et al.[111]	Austria	-	-	-
2013	Sibley & Sibley[60]	UK	Morocco	-	-
2013	Pretelli et al.[79]	Italy	Italy	-	-
2012	Lankester & Brimblecombe[86]	UK	Europe	-	-
2012	Yung & Chan[38]	Hong Kong	Hong Kong	-	-
2011	Troi[11]	Italy	Europe	1919-1945	Energy refurbishment
2011	Godwin[85]	UK	UK	-	-
2011	Buhagiar & Jones[95]	Malta & UK	-	-	-
2011	Kamaruzzaman et al.[63]	Malaysia & UK	Malaysia	1900	Surveys
2010	Zhai & Previtali[110]	USA	World	-	Simulation
2010	Cardinale et al.[71]	Italy	Italy	1204	Simulation, Monitoring & Energy refurbishment
2009	Abuku et al.[112]	Belgium & Denmark	Germany	-	CFD & Simulation
2009	Zitek & Vyhliđal[35]	Czech Republic	Czech Republic	-	Monitoring
2008	Hatamipour & Abedi[109]	Iran	Iran	-	-
2005	Ozay[59]	Turkey	Cyprus	-	-
2002	Grinzato et al.[24]	Italy	Italy	1104	Monitoring & Thermography
1980	Johnsen[15]	Denmark	Denmark	-	-
1978	Prömmel[14]	Germany	Germany	-	-

2.4. Discussion

When the energy efficiency and thermal comfort in historic buildings discourse shifted from mere building and systems analysis to more complex aims, such as comparative exercises and artwork conservation, new investigative techniques and empirical objectives flooded the research arena. Today, the most common analytical procedures for analysis include thermography, energy simulations, thermal comfort surveys, and the monitoring of indoor environmental conditions. However, the past few years also saw an exponential growth in the application of CFD. CFD (Computational Fluid Dynamics)

simulates indoor and outdoor fluid behaviors, making it extremely useful for natural and mechanical ventilation, heating and cooling examination. For example, CFD has allowed researchers to analyze passive ventilation patterns and airflows in historic structures and either apply them to modern designs or to determine the necessity for rehabilitation. Other new procedures that are noteworthy include: the use of GIS (Geographic Information System) for energy studies on an urban scale; EPC's (Energy Performance Certifications) for historic buildings, which allow for a uniform approach to keep the structures within modern energy efficiency standards; and, the use of PCM's (Phase Change Materials), which are smart materials that allow passive cooling or heating of historic structures while minimizing energy expenditure and the use of HVAC systems.

Interest in energy efficiency and thermal comfort in historic buildings research will continue to grow in the coming years. This is not only due to the need for conservation, but also due to the prevalence of historic building within our cities and neighborhoods. Historic buildings cannot therefore continue to be ignored by international standards of energy efficiency. In fact, ASHRAE recently published a draft of its new standard entitled, "Energy Guideline for Historical Buildings" [113]. The authors predict that techniques such as the implementation of Phase Change Materials (PCM), the use of Geographic Information Systems (GIS) (which allow for the visualization and analysis of any phenomenon that has a spatial component), Computational Fluid Dynamics (CFD) tools, and thermal comfort surveys will continue to be the primary tools for analysis.

2.5. Results and Partial Conclusions

In the last decade the importance of energy efficiency and thermal comfort in historic buildings has increased immensely, as evidenced by the many research projects and initiatives that have been undertaken. The goal of merging energy efficiency measures and internal thermal comfort with the requisite of maintaining cultural and historic significance of the buildings motivates

mechanical engineers, architects, historians, public institutions and private owners to work together. Meeting all professional requirements of every specialist involved, however, is extremely challenging.

This chapter has reviewed some of the key thermal comfort and energy efficiency studies in built heritage sites between 1978 and 2014. However, since the time this article was written, other noteworthy publications on the topic of energy efficiency in historic buildings emerged. Krarti [114] published a review outlining the energy sector characteristics in Kuwait. Tadeu et al.'s [115] study is an audit of environmental assessment and cost optimization for energy efficiency refurbishment for a 20th century building in Coimbra, Portugal (Classified as a UNESCO World Heritage site).

With goals similar to the ones shared by the authors of this paper, in 2012 and 2013, Yung [38] and Fabbri [7] respectively, also reviewed scientific literature pertaining to energy efficiency and thermal comfort in historic buildings. This paper, however, has aimed to take a step forward by widening the breadth of the research analyzed by Yung [38] and Fabbri [7]. The following conclusions are synthesized from this review:

European countries are generally the ones most interested in improving indoor climate and reducing energy consumption in historic buildings. Italy, due to its huge built heritage, is leading this research.

Buildings from the 19th and the 20th century are most frequently analyzed and used as study cases by researchers because of their accessibility, the ease with which energy retrofit strategies can be applied to these structures, and the generally lower protection levels.

The main purpose of most of the investigations (73%) was to reduce energy consumption and improve indoor thermal comfort while maintaining the buildings' historic value.

Residential, religious and museums are the buildings types that are most frequently utilized with 24%, 17% and 14% of papers, respectively, dedicated to them.

Proper energy retrofits of heritage buildings undoubtedly contribute not only to reducing carbon emissions and energy consumption while enhancing sustainable development and improving indoor thermal comfort, but also to maintaining cultural and historic legacies. We should therefore aim to preserve built heritage for future generations. The best way to accomplish this goal by adapting historic structures to modern comfort and environmental standards and thereby keeping them in use. The strategies, projects, and ideas discussed in this paper provide useful examples for cities and governments worldwide.



Capítulo 3. Metodología de los Casos de Estudio

Uno de los principales aspectos a la hora de gestionar una rehabilitación energética de un edificio histórico es la falta de información acerca del edificio. En este caso, una metodología rigurosa, detallada y en profundidad resulta fundamental para la auditoría energética. En este capítulo se presentan unas directrices para llevar a cabo dichos estudios con el objetivo de mejorar tanto el consumo energético del edificio como el confort térmico de los ocupantes. Los principales puntos de este proceso son: la recopilación de toda la información disponible de los edificios, monitorización del ambiente interior y exterior, recopilación de los datos de satisfacción térmica de los usuarios, modelización, análisis y propuesta de soluciones y estrategias eficientes.

3.1. Descripciones de los Edificios

Para realizar una aportación en el campo de la eficiencia energética y el confort térmico en edificios históricos se han seleccionado dos diferentes tipologías edificativas con diferentes usos. La selección de ambos edificios se ha basado en la experiencia adquirida durante la realización la revisión bibliográfica del capítulo 2. Ambos proyectos se encuentran en el ambiente cultural, climático y legislativo de la Comunidad Valenciana. Los edificios elegidos han sido el Museo de Historia de Valencia (MHV) y el Colegio de Educación Infantil y Primaria (CEIP) Fabián y Fuero de Villar del Arzobispo. Según sus usos se pueden clasificar en museístico y docente, respectivamente. Por otro lado, atendiendo a su tipología constructiva están presentes, al menos, la construcción industrial valenciana del siglo XIX, y la construcción antigua-tradicional de principios del siglo XX. Sin embargo, ambos edificios fueron restaurados en mayor o menor medida, e incluso uno de ellos cambiado de uso, aunque obviamente conservando su valor patrimonial inalterado. En lo que a la clasificación climática se refiere, ambos pertenecen al clima mediterráneo, sin embargo disponen de algunas pequeñas diferencias que los hacen formar parte de mediterráneo-típico y oceánico-mediterráneo, respectivamente.

Las combinaciones entre características anteriores han permitido realizar interesantes comparaciones entre dos construcciones con el mismo uso (cultural), muy parecido emplazamiento climático, aunque diferente tipología y diseño arquitectónico.

Ambas auditorías energéticas se han llevado a cabo con la misma metodología, descrita en este capítulo.

3.1.1. Museo de Historia de Valencia

El primer edificio a estudiar es el actual Museo de Historia de Valencia (MHV). Fue construido en 1850 por Ildefonso Cerdá y Leodegario Marchessaux, a partir de un proyecto diseñado por Calixto Santa Cruz (Figura 6). El propósito del edificio era dar servicio como depósito general de aguas

potables de la ciudad (2.600m²), y durante más de un siglo desempeñó dicho cometido. El edificio, enladrillado y con grandes bóvedas, es un modelo de una época que hizo de la ingeniería el instrumento del cambio para dar el salto hacia el progreso.

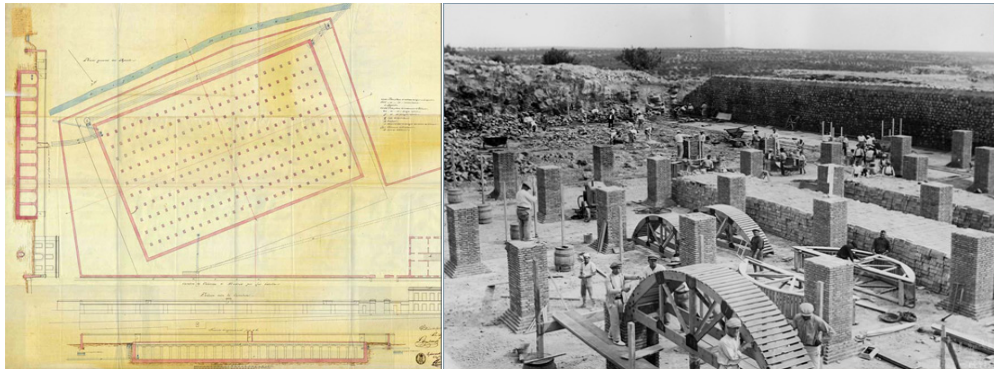


Figura 6. Fotografías de los planos de ejecución y construcción del edificio (Fuente: MHV).

Un bello ejemplo de la arquitectura industrial valenciana, considerado como la primera obra de ingeniería pública de la Valencia decimonónica. El sistema captaba el agua de una presa sobre el río Turia a la altura de Manises y la hacía llegar, tras pasar por filtros y balsas de decantación, hasta una canalización subterránea que la conducía al corazón del sistema, el depósito construido junto a la cruz del término de Mislata, desde donde era distribuida por la capital. El depósito está formado por un laberinto de doscientos cincuenta pilares que sostienen una cubierta formada por once bóvedas de medio punto realizadas con ladrillos procedentes de Manises y Aldaya [116]. Este espacio estuvo en desuso desde mediados del siglo XX.



Figura 7. Fotografías del exterior del Museo de Historia de Valencia (Fuente: MHV).



Figura 8. Fotografías del interior del Museo de Historia de Valencia (Fuente: MHV).

En 1998 y por acuerdo de la Comisión de Gobierno del Ayuntamiento de Valencia, se comenzaron las obras de conservación y adaptación del edificio que permitieron recuperar un recinto de gran belleza, que alberga desde entonces las dependencias del Museo de Historia de Valencia (MHV) (Figuras 7 y 8). Este museo tiene como objetivo primordial difundir la historia de la ciudad desde los orígenes a la actualidad, haciendo uso para ello de los fondos arqueológicos, artísticos y culturales municipales.

La altitud de la población de Mislata, donde se encuentra el edificio, es de 15 metros sobre el nivel del mar y su clima está considerado Mediterráneo típico, el cual se caracteriza por ser un clima suave y húmedo. Como se puede observar en la Figura 9 y según la clasificación Köppen [117], la zona se clasifica como clima Csa-mediterráneo (verano cálido).



Figura 9. Mapa de España de la clasificación climática de Köpper-Geiger (Fuente: www.aemet.es)

El edificio se encuentra en el número 42 de la Calle Valencia de Mislata (Valencia, $39^{\circ}28'0''$ N, $0^{\circ}22'30''$ W), frente al parque de Cabecera y el entorno es urbano de densidad media. Hay ligera presencia de vegetación al Sur y al Sudeste y entorno construido al Noroeste, Oeste, Sudoeste y Este (Figura 10).

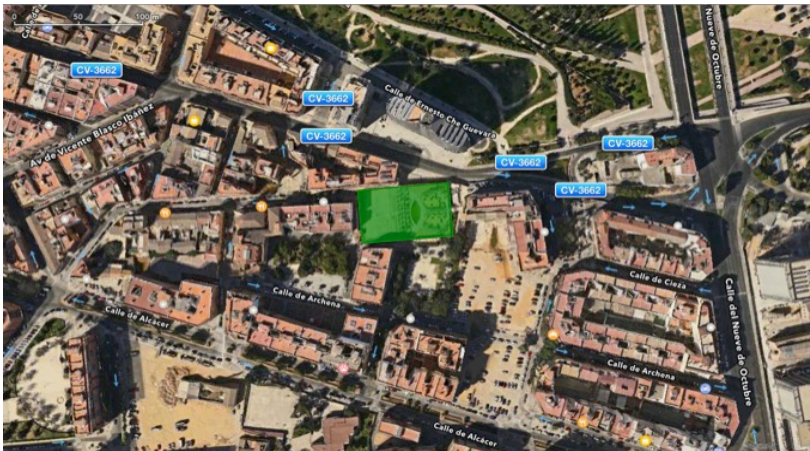


Figura 10. Fotografía aérea del emplazamiento del Museo de Historia de Valencia (Fuente: Google maps)

Este singular edificio está dotado de todos los equipamientos y servicios urbanos básicos como abastecimiento de agua potable, evacuación de aguas residuales a la red municipal de saneamiento, suministro de energía eléctrica, suministro de telefonía y acceso rodado por vía pública.

Su geometría totalmente rectangular y dispone de una sola planta (Figura 11). El acceso principal se encuentra en la fachada norte (aproximadamente 5° al oeste del Norte).

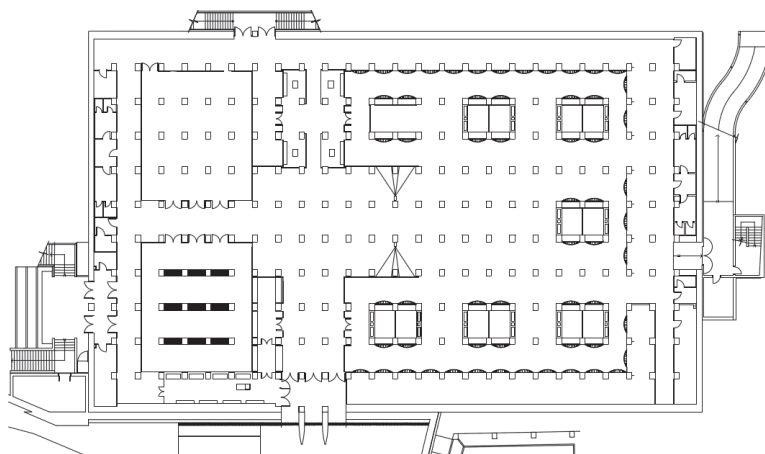


Figura 11. Plano general del Museo de Historia de Valencia (Fuente: Elaboración propia).

El edificio tiene un uso museístico, y como se observa en la Figura 12, la zonificación del mismo se puede organizar en exposición, distribución, oficinas y aseos. Sin embargo, una de las zonas designadas como “exposición” se encuentra abierta a la zona de “distribución” (Exposiciones temporales), por lo que se han considerado como espacio de “distribución”.

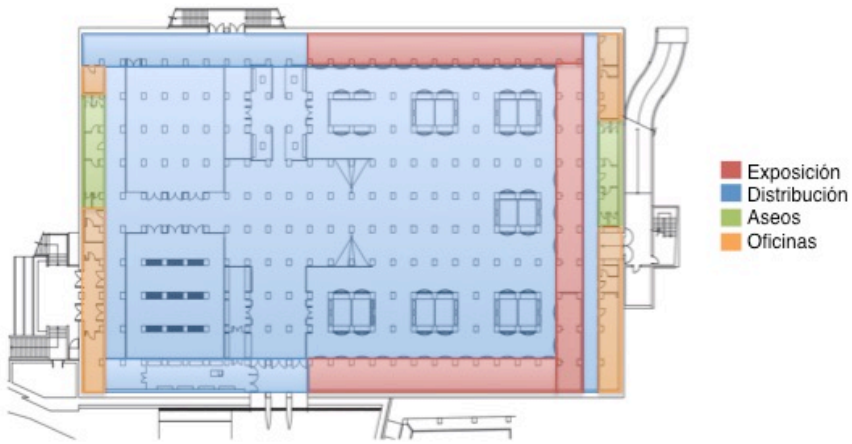


Figura 12. Zonificación del Museo de Historia de Valencia (Fuente: Elaboración propia).

El MHV tiene cuatro muros exteriores y un importante porcentaje de ellos se encuentra enterrado. Excepto la fachada norte (principal), todas las demás disponen de la misma tipología constructiva, materiales y espesor. Por lo tanto podemos concluir que existen 2 tipos de cerramientos verticales, además de la cubierta plana que cierra horizontalmente el MHV. En la Tabla 7 se pueden observar tanto los espesores como los valores de transmitancia de los diferentes cerramientos.

Tabla 7.
Espesor y conductividad de los diferentes cerramientos

Cerramiento	Espesor (m)	U (W/m ² k)
Muro exterior Sur	1,24	0,623
Muro exterior Este	1,24	0,623
Muro exterior Norte	2,80	0,470
Muro exterior Oeste	1,24	0,623
Cubierta plana	1,10	0,150
Suelo	0,85	0,263
Puertas secundarias	0,16	3,124
Puerta principal	0,02	5,207

El edificio es en su mayoría exento, excepto por aproximadamente el 30% de la fachada principal que hace de medianera con el edificio contiguo, y por la fachada oeste que hace de medianera en su totalidad a excepción de los dos extremos. La esquina norte de esta última fachada (oeste) desemboca en un callejón que resulta ser la prolongación del Camino Viejo de Xirivella, en esta

zona peatonal está situada la puerta de acceso a las oficinas del MHV. Por el contrario, el extremo sur de esa misma fachada termina en una pequeña plaza situada en la Calle de Archena. Por su parte, la fachada sur linda con el parque de la Calle de Yátova. Ya por último, la fachada oeste se encuentra por un lado con la Calle Valencia y por el otro con el parque de la Calle Archena. Estas peculiaridades vienen ocasionadas debido a que la cubierta plana del edificio es pública y transitable. Ésta está ocupada por una pista de fútbol sala con suelo de cemento y un parque de ocio con zona verde y una fuente ovalada en el centro.

Como ya se ha comentado anteriormente, el edificio está construido a una cota inferior a la rasante natural del terreno, es decir, sus fachadas están enterradas, parcial o totalmente. En la fachada sur se halla un hueco de aproximadamente 2 metros de anchura, donde se sitúan las escaleras que bajan a las puertas de acceso secundarias del MHV, como se puede ver en la Figura 13.

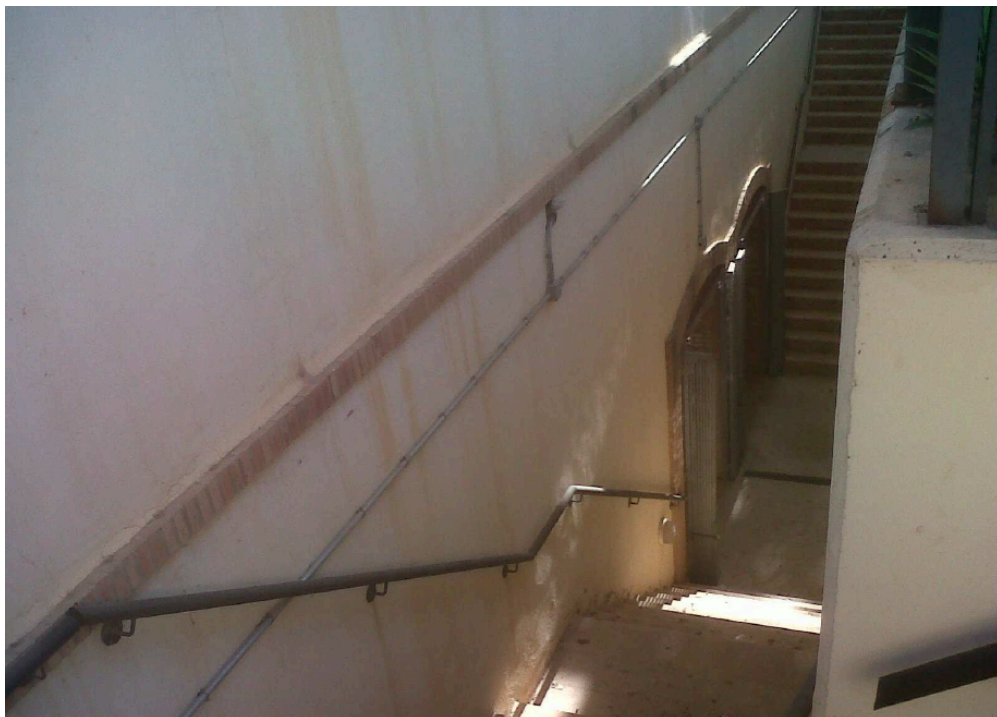


Figura 13. Hueco exterior de escalera sur del Museo de Historia de Valencia (Fuente: Elaboración propia).

Este patio, lo delimita por una parte el muro exterior del museo y por la otra un muro de 30cm de espesor en contacto con el terreno que tiene en su parte superior un vallado de seguridad para evitar el paso. En la Figura 14 se observa parte de la fachada este, donde también existe un patio de las mismas características aunque de mayores dimensiones. En esta ocasión, el patio es utilizado para albergar las casetas y cajas de instalaciones.



Figura 14. Hueco exterior este de acceso e instalaciones del Museo de Historia de Valencia (Fuente: Elaboración propia).

Las cerramientos del edificio son muy interesantes, ya que al haber modificado el uso del edificio, también este elemento constructivo tuvo que ser adaptado. El sistema estructural está constituido por una cimentación compuesta de una losa de mampostería de 60cm de espesor tomada con mortero de cal. Los pilares son de ladrillo que dan lugar a arcos de medio punto, que a la vez, sostienen bóvedas de cañón de ladrillo, que dan soporte a la

cubierta. Dicha cubierta, que es plana e invertida, fue reformada en 1998 y resuelta con una losa de hormigón armado. La impermeabilización se soluciona con una lámina de betún bituminoso y además incorpora una capa de aislamiento de fibra de vidrio (Figura 15).



Figura 15. Construcción de la cubierta plana del Museo de Historia de Valencia (Fuente: MHV).

Los muros exteriores también fueron modificados durante la reforma realizada en 1998, en su origen estaban compuestos por 95 cm de mampostería y mortero de cal, como se puede observar en la figura 16. Además, se añadió una cámara de aire de 18cm y una tabiquería exterior de ladrillo hueco cerámico de 24x11,5x11 cm (Figura 17).



Figura 16. Muro exterior de mampostería y mortero de cal del Museo de Historia de Valencia (Fuente: Elaboración propia).

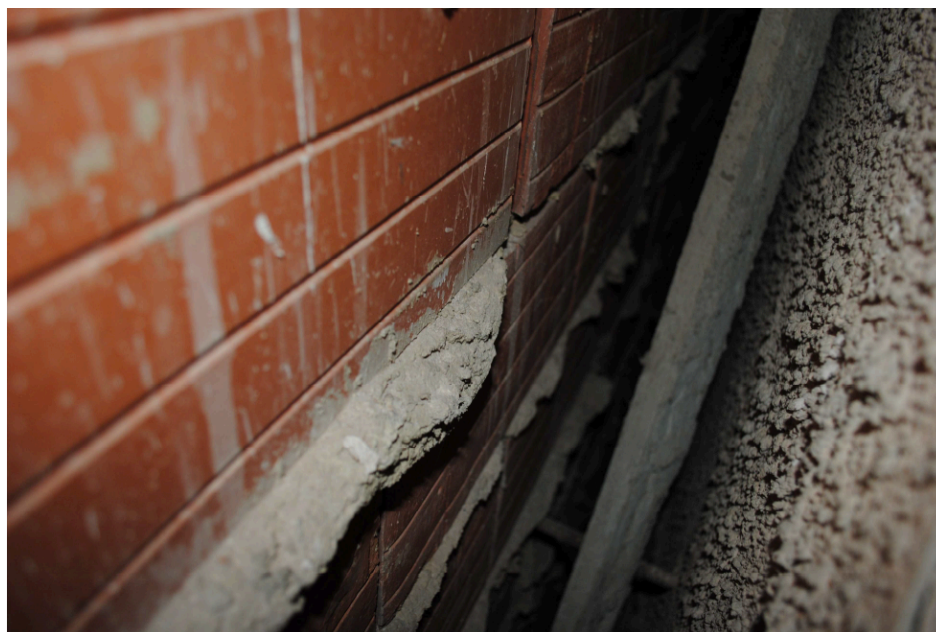


Figura 17. Cámara de aire del muro exterior del Museo de Historia de Valencia (Fuente: Elaboración propia).

La base del pavimento que esta en contacto con la cimentación, está formada por una solera realizada con mortero de cemento de 4 cm de espesor sobre una capa arena de 6 cm. Estas dos capas se terminan con pavimento de terrazo de 30 x 30 cm. Asimismo, en la zona central del MHV se eleva una estructura metálica prefabricada de 37 cm de altura para apoyar listones de madera de 3 cm de espesor para formar una tarima.



Figura 18. Cata de la solea del Museo de Historia de Valencia (Fuente: Elaboración propia).

La figura 18 muestra una cata que se realizó con el permiso de la dirección del Museo de Historia de Valencia y del Ayuntamiento de Valencia, para determinar los espesores de mortero y arena. Por último, respecto a los revestimientos y pintura, los paramentos verticales de fábrica de ladrillo se revisten exteriormente con un mortero monocapa y pintura de textura lisa de color amarillo.

Por último, el edificio dispone de varias puertas de acceso, aunque la principal se encuentra en la fachada Norte. Esta es una puerta de 6 hojas totalmente acristaladas, con un retranqueo de 2,5 m. El resto de accesos son puertas exteriores metálicas situadas una en cada fachada, excepto en la fachada Este que se hayan dos puertas.

Respecto a las instalaciones de climatización del Museo de Historia de Valencia, en el edificio hay funcionando diez unidades de tratamiento de aire de la compañía GER S.A. de la serie MC (figura 19). Son dispositivos que se encargan tanto de la ventilación mecánica como de la climatización del edificio.

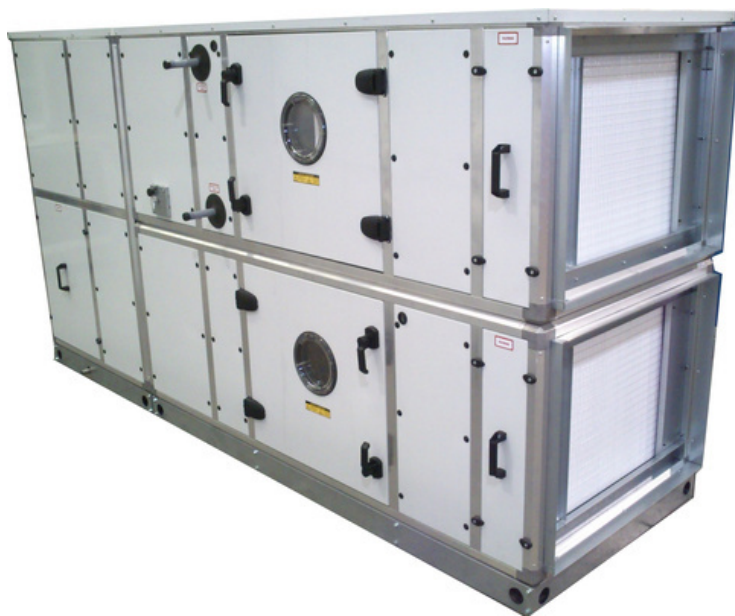


Figura 19. Cata de la solea del Museo de Historia de Valencia (Fuente: www.gersa.com)

Estos equipos están repartidos en los extremos Este y Oeste del edificio, cinco dispositivos a cada lado, encajados en el techo (figura 20). Desde esa posición salen los conductos vistos de ventilación por la parte superior del edificio, y los tubos de retorno por la parte inferior del mismo.

Tabla 8. Especificaciones de los equipos instalados en MHV (Fuente: www.gersa.com)

Valor	Sensación
Caudal de aire	1.000-80.000m ³ /h
Velocidad del aire	2-3 m/s
Tensión	220-380V

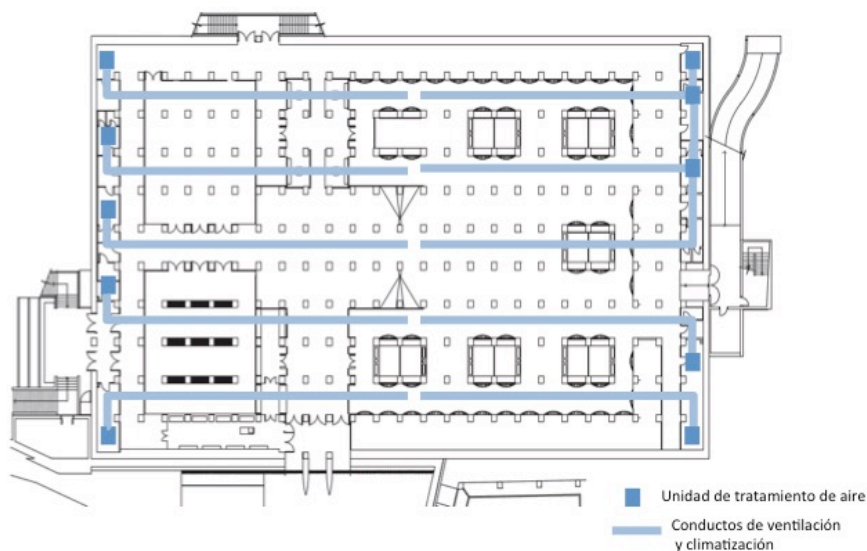


Figura 20. Distribución del sistema de climatización del Museo de Historia de Valencia (Fuente: Elaboración propia).

3.1.2. C.E.I.P. Fabián y Fuero

El segundo edificio analizado ha sido analizado el Colegio de Educación Infantil y Primaria (C.E.I.P.) Fabián y Fuero de Villar de Arzobispo (Valencia), construido en 1927. Originalmente, fue diseñado y construido como dos edificios independientes, para poder separar por género a los alumnos (Figura 21), y unidos en 1930 para poder ampliar sus servicios dado el crecimiento de la población del municipio, manteniendo la diferenciación de sexos, esta vez por plantas. Como se observa en la figura 22, el edificio es un magnífico ejemplo de la arquitectura de la época, construido en piedra revocada consta de dos plantas con dos torreones unidos por un cuerpo central. En sus fachadas dispone de varios elementos decorativos realizados en cerámica vidriada de Manises,

destacando las dos tiras que aparecen en la fachada principal con dibujos modernistas representando aves exóticas (Figura 23).



Figura 21. C.E.I.P. Fabián y Fuero con su estructura original de dos edificios independientes (Fuente: Ayuntamiento de Villar del Arzobispo).

El edificio formó parte de una campaña de construcción de instalaciones docentes por orden del general Miguel Primo de Rivera en 1927, además, se utilizó como hospital durante la guerra civil española. El terreno en el que se encuentra el centro pertenece al ayuntamiento, sin embargo, el edificio en si pertenece a la Consellería de Educació, aunque está previsto que sea donado en un futuro cercano a la población de Villar del Arzobispo. La construcción alberga el Colegio de Educación Infantil y Primaria (C.E.I.P.) Fabián y Fuero, el cual está dividido en dos edificios dentro de la misma localidad. Este local alberga los alumnos de educación Infantil (3-5 años) y los alumnos de primero de primaria (6-7 años). En el centro trabajan 10 docentes a tiempo completo y 3 a tiempo parcial, lo cual sumado a los alumnos hacen un total de 133 usuarios diarios.



Figura 22. C.E.I.P. Fabián y Fuero con su estructura y apariencia actuales (Fuente: Ayuntamiento de Villar del Arzobispo).



Figura 23. Detalles cerámicos de las fachadas (Fuente: Elaboración propia).

La altitud de la población de Villar del Arzobispo es de 520 metros sobre el nivel del mar y su clima está considerado Mediterráneo típico, el cual se

caracteriza por ser un clima suave y húmedo. Como se puede observar en la Figura 22 y según la clasificación Köppen [117], la zona se clasifica como clima Csb-Océánico-mediterráneo (verano suave) (Figura 24).



Figura 24. Mapa de España de la clasificación climática de Köppen-Geiger. (Fuente: www.aemet.es)

El edificio se encuentra en la plaza Huerto del Señor s/n de Villar del Arzobispo ($39^{\circ}43'50''N$ $0^{\circ}49'32''W$), El entorno es urbano de baja densidad. Hay una ligera presencia de vegetación y una fuente al Oeste de la construcción y entorno construido al Norte, Sur y Este (Figura 25).



Figura 25. Fotografía aérea del emplazamiento del C.E.I.P. Fabián y Fuero (Fuente: Google maps)

El edificio también posee todos los equipamientos y servicios urbanos que la población de Villar del Arzobispo ofrece a la población como abastecimiento de agua potable, evacuación de aguas residuales a la red municipal de saneamiento, suministro de telefonía y acceso rodado por vía pública. La geometría de la construcción actual tiene forma de H y dispone de dos plantas iguales (Figuras 26 y 27). El acceso principal se encuentra en la fachada este.

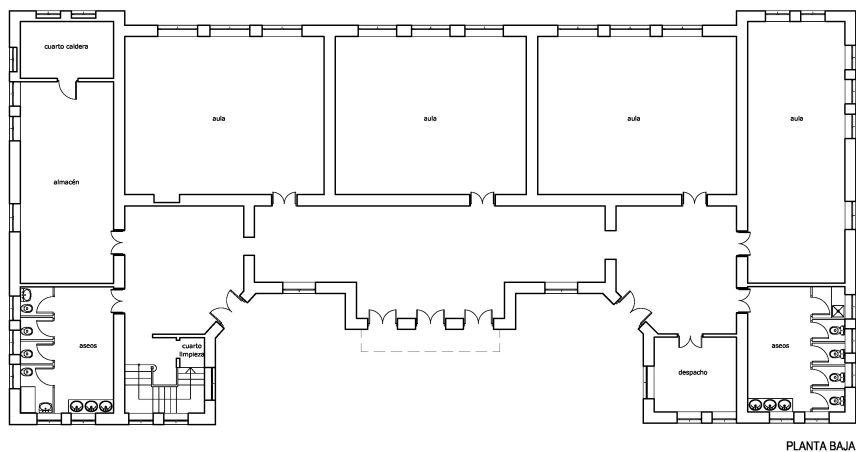


Figura 26. Plano de Planta Baja del C.E.I.P. Fabián y Fuero (Fuente: Elaboración propia).

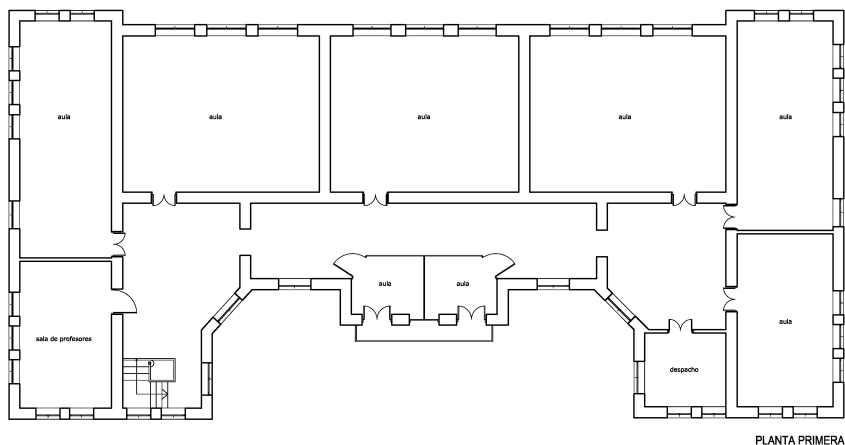


Figura 27. Plano de Planta Primera del C.E.I.P. Fabián y Fuero (Fuente: Elaboración propia).

El edificio tiene un uso docente, y como se observa en las Figuras 28 y 29, la zonificación del mismo se puede organizar en aulas y despachos, distribución, almacén y aseos. Sin embargo, en la planta primera tan sólo existen zonas de aulas y distribución.

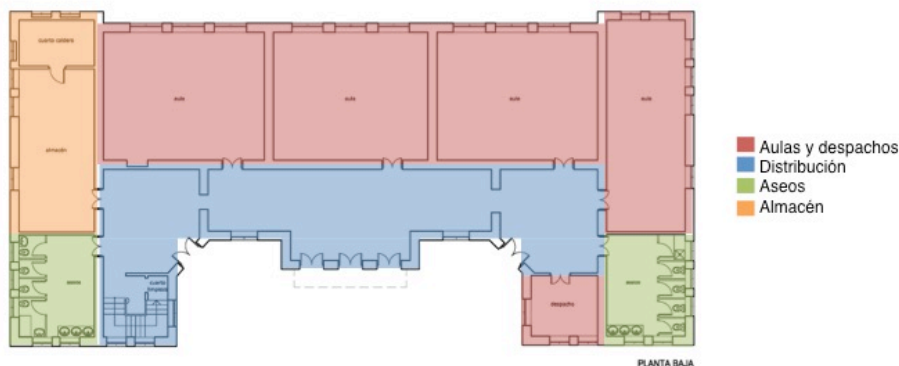


Figura 28. Zonificación de Planta Baja del C.E.I.P. Fabián y Fueero (Fuente: Elaboración propia).

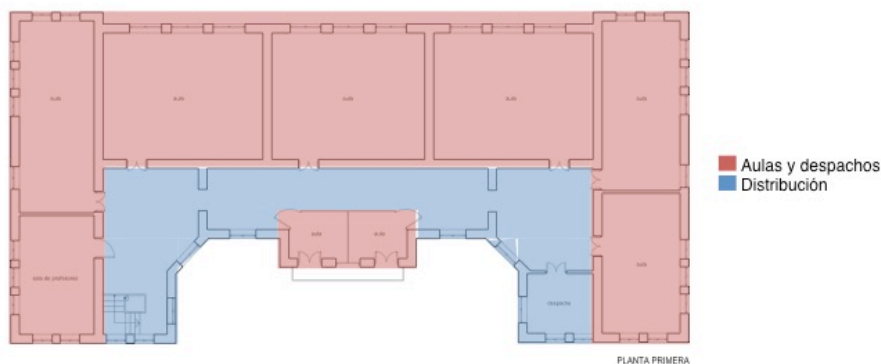


Figura 29. Zonificación de Planta Primera del C.E.I.P. Fabián y Fueero (Fuente: Elaboración propia).

En esta construcción, a pesar de disponer de varios muros exteriores, todos ellos tienen la misma tipología constructiva, materiales y espesor. Por lo tanto se puede concluir que tan sólo existe un tipo de cerramiento vertical, además de la cubierta inclinada del edificio. Tanto los espesores como los valores de transmitancia térmica de los diferentes cerramientos se pueden

observar en la Tabla 9. Además, el edificio dispone de varias puertas de entrada, en concreto cinco puertas, todas ellas situadas en la fachada oeste.

Tabla 9.
Espesor y conductividad de los diferentes cerramientos

Cerramiento	Espesor (m)	U (W/m ² k)
Muro exterior	0,60	0,352
Cubierta inclinada	0,50	2,930
Suelo	0,30	1,062
Puertas	0,04	3,633
Ventanas	0,06	5,778

La estructura que soporta el edificio y la cubierta, tanto cimientos como muros de carga, son de ladrillo cerámico. Esta cubierta inclinada, con estructura y entrevigado de madera, se completa con un entablado de madera en el que se han recibido las tejas sobre un mortero pobre en cemento.



Figura 30. Detalle del encuentro entre aleros del C.E.I.P. Fabián y Fuero (Fuente: Elaboración propia).

Los muros exteriores son de fábrica de ladrillo enlucida con una capa de aproximadamente un centímetro de mortero de cemento, con acabado en pintura de color crema. Así mismo, los vanos disponen también de aparejo de ladrillo visto con una intención decorativa, formando los arcos y dinteles.

La solera sobre la que está posado el pavimento de terrazo es de una capa de mortero de cemento regularizador sobre un forjado sanitario, el cual se levanta del terreno para aislar de la humedad del suelo en la medida de lo posible.



Figura 31. Fachada principal del C.E.I.P. Fabián y Fueo (Fuente: Elaboración propia).

Para finalizar con la envolvente, el edificio dispone de cinco puertas de acceso en el cuerpo central y dos puertas más en el balcón de la primera planta, todas encarando el oeste. Además, el centro dispone de 81 ventanas distribuidas a lo largo de las dos plantas. Todos estos huecos, están equipados con carpinterías de madera y vidrios simples, ambos necesitados de una rehabilitación o sustitución. Los ventanales de la planta baja tienen complicado

acceso, ya que están situados a una altura de dos metros de altura, lo que dificulta enormemente su apertura y por lo tanto la ventilación natural.



Figura 32. Detalle de ventana y puertas del C.E.I.P. Fabián y Fuero (Fuente: Elaboración propia).

La instalación de calefacción se compone de una red de radiadores repartidos por ambas plantas como muestran las figuras 33 y 34. La instalación dispone de programador por lo que no necesita ser activada diariamente, sin embargo, se debe regular la temperatura manualmente. Los días lectivos el equipo se pone en funcionamiento a las 07:00 y la desconecta al terminar la jornada lectiva, 17:30 horas, siendo la temperatura de consigna entre 20°C y 21°C, por norma general.

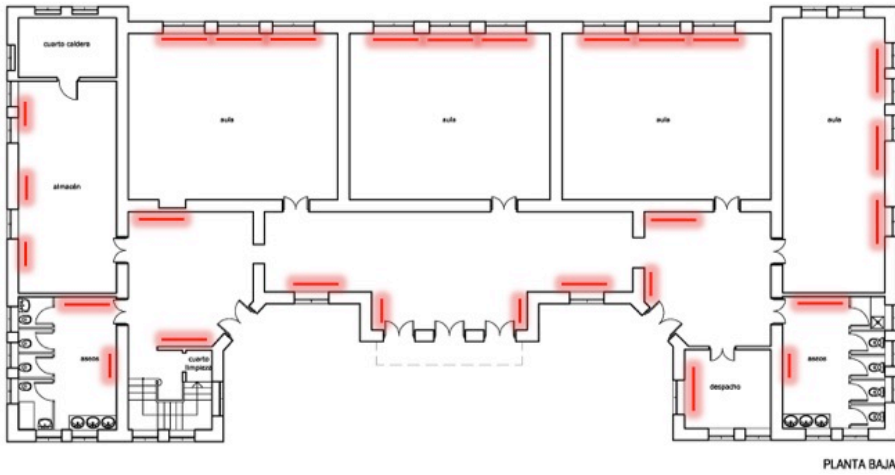


Figura 33. Distribución de radiadores de Planta Baja del C.E.I.P. Fabián y Fuero (Fuente: Elaboración propia).

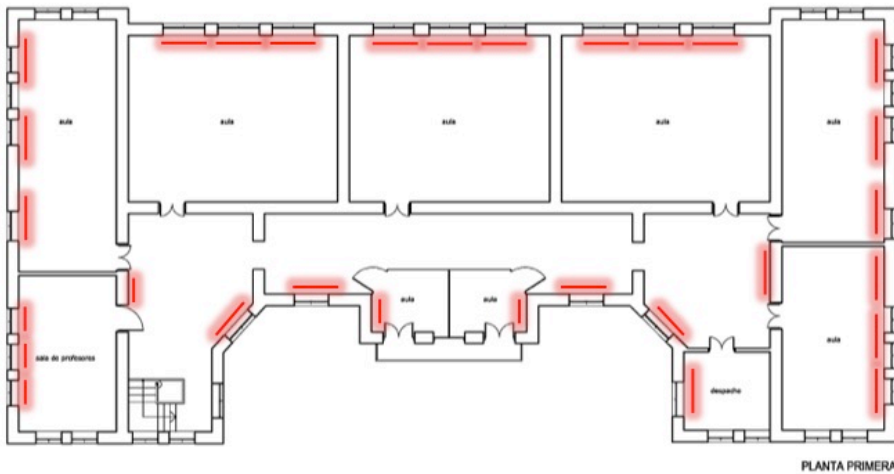


Figura 34. Distribución de radiadores de Planta Primera del C.E.I.P. Fabián y Fuero (Fuente: Elaboración propia).

La caldera que alimenta dichos radiadores (figura 35) del fabricante Compañía Roca Radiadores S.A. y el modelo es KADET-TRONIC. Las especificaciones de la instalación se encuentran en la tabla 10.

Tabla 10. Especificaciones de la instalación de calefacción del CEIP (Fuente: Elaboración propia).

Valor	Sensación
Potencia	94-237 kW
Viscosidad máx.	5,5cSt 37,8°C
Presión	3,6 m bar
Tensión	220v – 50 Hz



Figura 35. Zonificación de Planta Primera del C.E.I.P. Fabián y Fuero (Elaboración propia).

3.2. Monitorizaciones Meteorológicas e Interiores

El clima es el factor ambiental más importante y el primero en el cual se debe prestar atención al realizar una auditoría energética. Para lograr un edificio eficiente energéticamente, el diseño debe tener en cuenta el clima específico de su emplazamiento. El clima puede resolver qué estrategias pasivas pueden ser las más adecuadas. Por ejemplo, las técnicas pasivas útiles en un lugar cálido y seco pueden ser contraproducentes en un clima húmedo y frío.

La meteorología de un lugar en concreto depende de su latitud, altitud y terreno. Asimismo, el clima influye en muchos aspectos del diseño de un edificio, tales como la temperatura interior óptima, los factores definitorios del confort térmico y las demandas de energía del edificio.

Temperatura y humedad son dos de las condiciones ambientales principales que, además de movimiento de aire y el calor radiante, determinarán el estado de confort relativo de una persona. La temperatura y la humedad son también dos de los factores más importantes que deben tenerse en cuenta al diseñar la envolvente de un edificio y el dimensionamiento de las instalaciones. Dos parámetros básicos de la temperatura son la temperatura de bulbo seco y de temperatura de bulbo húmedo. A partir de estas mediciones se pueden conocer las características, tanto de la temperatura del aire como de la humedad. La temperatura de bulbo seco es simplemente la temperatura del aire, por lo que no tiene en cuenta la humedad. Se expresa en grados Celsius, grados Fahrenheit o Kelvin, y se puede medir con un termómetro expuesto al aire. Se conoce comúnmente como la temperatura del aire y se muestra en los informes meteorológicos básicos. En cambio, la temperatura de bulbo húmedo, es la temperatura del aire que toma en cuenta el potencial de enfriamiento de la evaporación. Se mide mediante la exposición del bulbo húmedo de un termómetro al flujo de aire (envolviendo el bulbo del termómetro en un paño húmedo y agitándolo al aire). La evaporación del agua contenida depende de la humedad del aire. Al igual que la temperatura de bulbo seco, temperatura de bulbo húmedo se puede medir en grados Celsius, grados Fahrenheit o Kelvin. La humedad por su parte, puede ser tan importante como la temperatura en cuanto al confort humano se refiere. El exceso de humedad puede intensificar el calor y hacer que se sienta el llamado "bochorno", sin embargo, que un ambiente no disponga de la suficiente humedad puede resultar incomodo también. El aire caliente retiene más humedad que el aire frío, pero las personas no percibimos el número absoluto de moléculas de agua que hay en el aire (la humedad absoluta, que se mide como la densidad), percibimos la humedad relativa que se representa como un porcentaje de vapor de agua en el aire. En general, un rango entre un 30% y un 70% de humedad relativa se considera confortable según el

Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo (INSHT) [118]. Por debajo del 30% se percibe seco, y superior al 70% se siente demasiada humedad (a menos que la temperatura sea baja).

La humedad también afecta a la efectividad de estrategias pasivas de eficiencia energética. El control de la humedad es también una función importante de las instalaciones. Existe una gran cantidad de calor latente en el agua, y deshumidificar el aire requiere condensar ese agua (lo cual puede suponer una gran cantidad de energía en refrigeración). La humedad puede ser determinada mediante la comparación de las temperaturas de bulbo seco y húmedo. Con un 100% de humedad en el aire, este está completamente saturado, por lo tanto las temperaturas de bulbo seco y húmedo serán las mismas. En el resto de casos, la temperatura de bulbo húmedo siempre será menor que la temperatura de bulbo seco debido al enfriamiento por evaporación. Cuanto mayor sea la diferencia entre las temperaturas de bulbo seco y húmedo, más seco y menos humedad relativa tendrá el aire.

Además de afectar la demanda energética, la humedad también puede afectar a otros factores de diseño sostenible, tales como el diseño de la envolvente del edificio. Si se conoce el rango de humedad de una corriente de aire, podemos identificar a qué temperatura del agua condensará (también conocido como punto de rocío). Conocido esto, se pueden evitar problemas tales como el moho o la disminución de rendimiento de aislamiento, con la colocación adecuada de barreras de vapor en los muros exteriores y cubiertas.

Por todo ello, es importante conocer detalladamente el clima al que un edificio es sometido, a la hora de conocer su comportamiento y las posibles mejoras a proponer. Esta ha sido una de las secciones clave de esta tesis, la monitorización meteorológica.

Por otro lado, se han monitorizado también los valores de temperatura y humedad relativa en el interior de ambos edificios con el objetivo de conocer como funcionan tanto los elementos activos como pasivos, y si estos son suficientes para mantener unos niveles de confort térmico adecuados para cada actividad. Para poder dar una respuesta efectiva, es necesario conocer la

problemática, y cuantos más datos se conozcan de la misma más eficaz resultará la solución. Ambas recopilaciones de datos son fundamentales para averiguar las debilidades de las construcciones y conseguir alcanzar la solución óptima.

Durante los distintos períodos de la investigación, los parámetros físicos que afectan el confort térmico, como la temperatura y la humedad relativa, fueron registrados siguiendo las indicaciones de la norma ISO 7726 "Ergonomía de los ambientes térmicos - Instrumentos de medida de las magnitudes físicas" [119].

3.2.1. Monitorización del Museo de Historia de Valencia

Se han recopilado tanto los datos meteorológicos del entorno del MHV como los datos interiores de temperatura y humedad. Esta monitorización se ha llevado a cabo durante 6 meses completos, desde el 1 de agosto de 2015 hasta el 31 de enero de 2016, con frecuencia horaria.

Respecto a los datos meteorológicos del MHV, la información ha sido obtenida de una estación meteorológica privada. La estación se encuentra a una altitud de 21 m, una latitud de 39° 28' 31" N y una longitud: 0° 22' 32" O, en el barrio de Nou Campanar de la ciudad de Valencia. Aunque el edificio se encuentra en la población de Mislata y la estación meteorológica en la ciudad de Valencia, la distancia que existe entre ellas es de aproximadamente 3 km, por lo que se considera esta estación aceptable para el estudio. Debido a que la página web de dicha estación, www.meteovalencia.es (véase la Figura 36), tan sólo almacena los datos de los últimos ocho días, se han descargado estos datos semanalmente durante el período que ha durado la investigación. Estos informes semanales se han descargado en formato .txt y se han exportado a formato Excel para su posterior análisis, como se puede observar en la Figura 37. Estos archivos proporcionan datos como la temperatura, humedad relativa, punto de rocío, velocidad y dirección del viento, presión atmosférica, precipitaciones, radiación solar y demás datos atmosféricos. Todos ellos extremadamente útiles para la simulación del entorno del modelo, conocer las condiciones a las que se enfrenta el edificio y decidir las estrategias pasivas a aplicar en el edificio.

el MHV que controlan en todo momento los valores de temperatura y humedad para asegurar la correcta conservación de las obras que este alberga. Estos dispositivos son sondas de marca Siemens y modelo Symaro (Figura 38), sus principales especificaciones se pueden observar en la tabla 9. En la Figura 39 se puede observar el plano de situación de las sondas utilizadas en esta monitorización. No se han podido seguir todas especificaciones de la norma ISO 7726 [119] sobre la colocación de las mismas, sin embargo, estas están situadas alejadas de fuentes de calor como proyectores, equipos informáticos o instalaciones, y a una altura de 1,70m de altura como dicta la norma para persona de pie. Estas dos condiciones son los principales requerimientos de la citada norma, por lo que se considera adecuada la situación de las sondas.



Figura 38. Sondas Siemens-Symaro instaladas en el Museo de Historia de Valencia (Fuente: Elaboración propia).

Tabla 11. Especificaciones técnicas sondas Siemens-Symaro instaladas en el Museo de Historia de Valencia (Fuente: www.siemens.com).

Sonda	Marca	Número	Rango de operación	Precisión	Tiempo de respuesta
Temperatura	Siemens	12	-30/50°C	0,2 °C	60 seg.
Humedad	Siemens	12	0/100 % h.r.	5% h.r.	60 seg.



Figura 39. Plano de situación de las sondas de temperatura y humedad en el MHV (Fuente: Elaboración propia)

Los dispositivos estaban previamente configurados para recoger medidas de temperatura y humedad dos veces al día (09:00h y 21:00h), sin embargo estas fueron reconfiguradas para obtener medidas con un intervalo horario. Por lo tanto, cada hora las sondas enviaban los datos correspondientes a una centralita que alberga una base de datos informatizada. Como se puede ver en la figura 40, la configuración y descarga de los datos se realizó mediante el software UNIWIN que controla la red de control del ambiente interior. Este programa informático fue diseñado especialmente para este edificio por la empresa Desigo S.L.

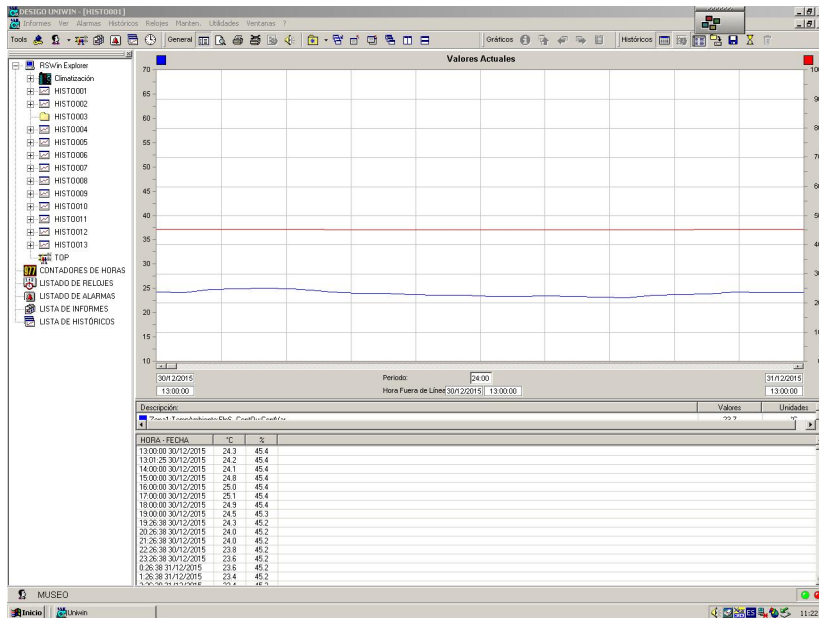


Figura 40. Interfaz del software utilizado para la configuración de las sondas del MHV (Fuente: Programa informático Desigo Uniwin).

3.2.2. Monitorización del C.E.I.P. Fabián y Fuero

Como en el caso anterior, se han recogido los datos meteorológicos, y la temperatura y humedad relativa del interior del edificio con frecuencia horaria. En esta ocasión, el período de estudio ha durado 4 meses, desde el 1 de octubre de 2015 hasta el 31 de enero de 2016.

La monitorización de las condiciones meteorológicas se ha llevado a cabo gracias a la colaboración del Instituto Valenciano de Investigaciones Agrarias (IVIA). Esta institución dispone de una estación meteorológica en el término de Chulilla (Figura 41), que sin embargo, se encuentra a escasos 5 kilómetros del edificio y a la cual se ha tenido acceso. Su altitud sobre el nivel del mar es de 512 metros, tiene una latitud de 39°43'59"N y una longitud de 0°49'59" O. A pesar de estos 5 kilómetros de distancia como se observa en la Figura 42, se ha considerado la estación meteorológica como adecuada por ser la más cercana de estas características, además de que prácticamente comparten altitud .



Figura 41. Estación meteorológica riegos IVIA(Fuente: www.riegosivia.es).

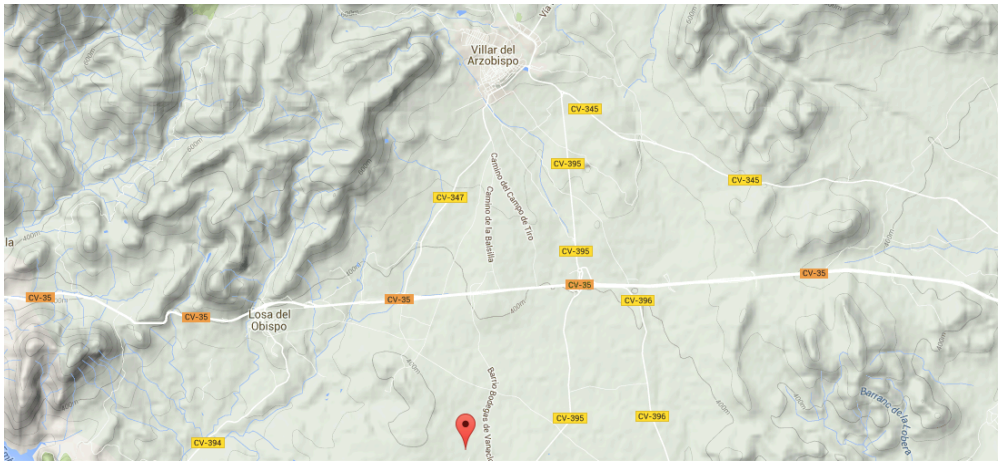


Figura 42. Estación meteorológica riegos IVIA (Fuente: Google maps).

Al contrario que la página web de “meteovalencia”, no existen limitaciones de tiempo de intervalos para la descarga de los datos meteorológicos en la página de <http://riegos.ivia.es> (Figura 43). Por lo tanto,

estos datos se descargaron todos simultáneamente al finalizar el período de monitorización. Este archivo se pudo obtener directamente en formato de hoja de cálculo para su posterior análisis (Figura 44). Los datos proporcionados se corresponden con temperatura, humedad relativa, radiación solar, velocidad del viento, dirección del viento y precipitación.

The screenshot shows the website interface for Riegos IVIA. At the top, there is a navigation bar with links: Inicio, Investigación y transferencia, Red SIAR, Meteorología, Necesidades de riego, Servicios, and Noticias y avisos. Below this, there are sections for 'ÚLTIMAS NOTICIAS' and 'DATOS POR ESTACIONES'. The 'DATOS POR ESTACIONES' section contains a table with the following columns: Estación, Fecha, V (Kmh), DV, T (°C), Tn (°C), Tx (°C), H (Hjo), HR (%), Rad (Mj/m² día), H (sol), P (mm), and Eto (mm). The table lists data for various stations including Agost, Algorza, Almoradí, Altea, Benavites, Benicarló, Benifacó, Bobate, Burjassot, Salginés, Sàlter, Callosa d'En Sarrà, Camp de Mirra, Campo Arcís, Caracant, Carlet, Castelló de la Plana, Catriel, and Cheste.

Figura 43. Página web riegos IVIA (Fuente: www.riegos.ivia.es).

Provincia	Termino	Estación	Fecha	Hora	Temperatura	Humedad relativa	Radiación (w/m²)	Velocidad del viento (km/h)	Dirección del viento	Precipitación (mm)
València	Chullilla	Chullilla	01/10/2015	00:30	13.19	97.3	0	0.6	NO	0
València	Chullilla	Chullilla	01/10/2015	01:00	13.33	97.6	0	0.92	SO	0
València	Chullilla	Chullilla	01/10/2015	01:30	13.78	97.9	0	1.53	O	0
València	Chullilla	Chullilla	01/10/2015	02:00	13.38	97.9	0	0.53	N	0.1
València	Chullilla	Chullilla	01/10/2015	02:30	12.53	97.9	0	0.64	SO	0
València	Chullilla	Chullilla	01/10/2015	03:00	12.16	98	0	1.11	S	0
València	Chullilla	Chullilla	01/10/2015	03:30	12.85	98.2	0	2.21	O	0
València	Chullilla	Chullilla	01/10/2015	04:00	12.87	98.3	0	3.12	SO	0
València	Chullilla	Chullilla	01/10/2015	04:30	12.65	98	0	2.8	SO	0
València	Chullilla	Chullilla	01/10/2015	05:00	12.6	97.6	0	3.5	SO	0
València	Chullilla	Chullilla	01/10/2015	05:30	12.51	97	0	3.42	SO	0
València	Chullilla	Chullilla	01/10/2015	06:00	12.42	96.3	0.97	2.55	SO	0.1
València	Chullilla	Chullilla	01/10/2015	06:30	12.38	95.9	29.29	2.78	SO	0
València	Chullilla	Chullilla	01/10/2015	07:00	12.96	93.8	104.9	2.87	NO	0
València	Chullilla	Chullilla	01/10/2015	07:30	13.72	87.7	179.8	5.21	O	0
València	Chullilla	Chullilla	01/10/2015	08:00	14.98	81.5	249.4	4.77	O	0
València	Chullilla	Chullilla	01/10/2015	08:30	16.2	75.6	323.4	5.09	O	0
València	Chullilla	Chullilla	01/10/2015	09:00	17.68	69	407.3	4.99	SO	0
València	Chullilla	Chullilla	01/10/2015	09:30	19.27	62.01	499.9	4.28	O	0
València	Chullilla	Chullilla	01/10/2015	10:00	20.46	59.73	558.5	3.27	SO	0
Provincia	Termino	Estación	Fecha	Hora	Temperatura	Humedad relativa	Radiación (w/m²)	Velocidad del viento (Km/h)	Dirección del viento	Precipitación (mm)

Figura 44. Datos meteorológicos obtenidos para la estación meteorológica de Chullilla de IVIA (Fuente: www.riegos.ivia.es).

Respecto a la monitorización interior de temperatura y humedad relativa del edificio, se ha llevado a cabo utilizando 4 sondas que fueron instaladas en el edificio exclusivamente para este estudio. Al contrario que la red de monitorización instalada en el MHV, en este caso las sondas disponen de una memoria interna propia donde se almacenan los datos recogidos, por lo que es necesario realizar la descarga y programación en cada uno de los dispositivos. Además, estos dispositivos son móviles y con un tamaño suficientemente reducido como para poder emplazarlos en cualquier lugar sin afectar a las actividades del centro educativo. Estos dispositivos son sondas de la marca PCE Ibérica y modelo HT-71 (Figura 45).



Figura 45. Sonda de temperatura y humedad PCE-HT 71 utilizada en la monitorización del CEIP Fabián y Fuero (Fuente: www.pce-iberica.com).

En las Figuras 46 y 47 se puede observar el plano de situación de las sondas utilizadas en esta monitorización, en las plantas baja y primera. Los dispositivos fueron colocados centrados, dentro de las posibilidades, sin perturbar las actividades de la clase y lejos de fuentes de calor tales como proyectores o equipos informáticos. Las mediciones se tomaron a una altura de 1,1 m como se recomienda por la norma ISO 7726 [119] para personas sentadas. La tabla 12 revela las especificaciones técnicas de los dispositivos instalados.

Tabla 12.

Especificaciones técnicas sondas PCE-Ibérica HT-71 instaladas en el C.E.I.P. Fabián y Fuero (Fuente: www.pce-iberica.com).

Sonda	Marca	Número	Rango de operación	Precisión	Tiempo de respuesta
Temperatura	PCE-Ibérica	4	-40/105°C	1 °C	60 seg.
Humedad	PCE-Ibérica	4	0/100 % h.r.	3% h.r.	60 seg.

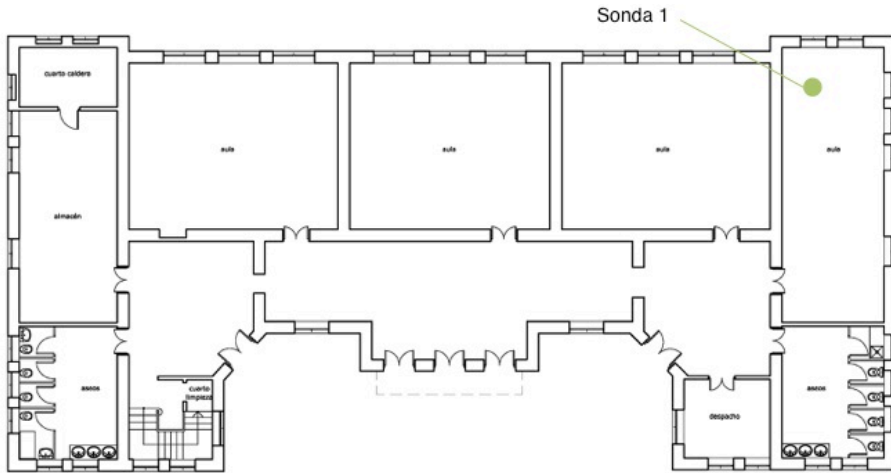


Figura 46. Plano de situación de la sonda de temperatura y humedad. C.E.I.P. Fabián y Fuero, Planta Baja (Fuente: Elaboración propia).

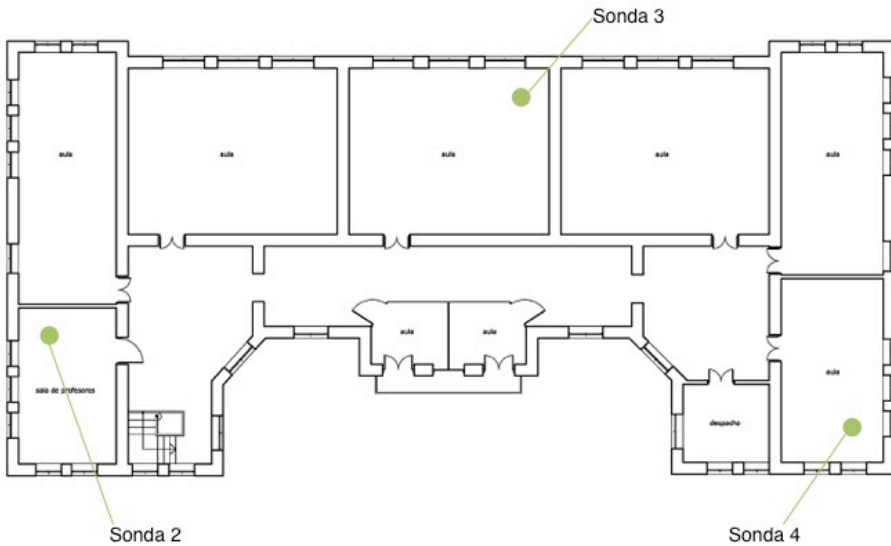


Figura 47. Plano de situación de las sondas de temperatura y humedad. C.E.I.P. Fabián y Fuero, Planta Primera (Fuente: Elaboración propia).

Los dispositivos fueron configurados para recopilar los datos de temperatura y humedad relativa en intervalos horarios. Por lo tanto, cada hora guardaba esta información en su memoria interna. Como se puede ver en la figura 48, la configuración y descarga de los datos se realizó mediante el software

“HT16X Communication tool” que controla cada sonda una vez se conectan a un ordenador. Este programa informático fue diseñado por la propia compañía PCE Ibérica para la gestión y manejo de estas dispositivos.

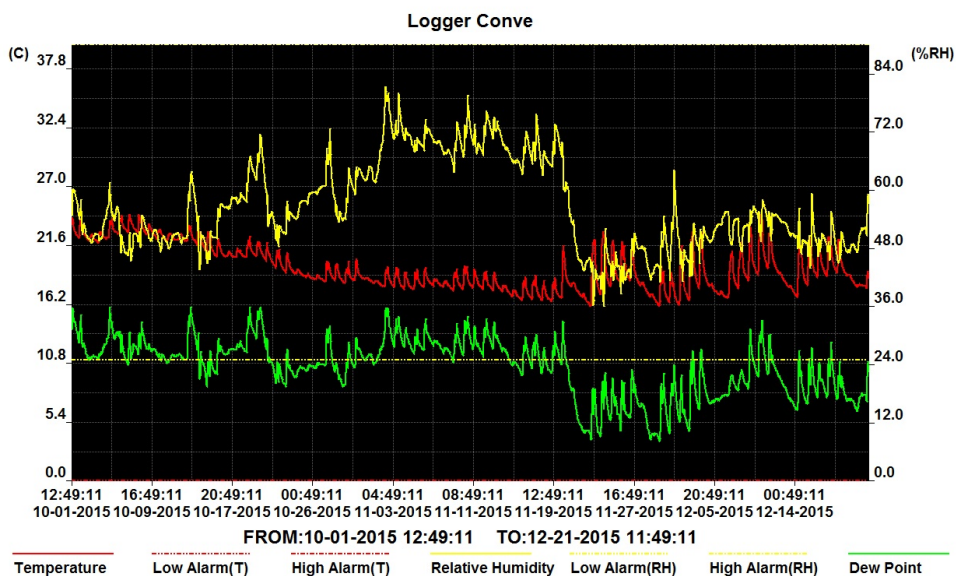


Figura 48. Interfaz del software utilizado para la configuración de las sondas del C.E.I.P. Fabián y Fuero (Fuente: Programa HT16X Communication tool).

3.3. Estudios Estadísticos del Confort Térmico

Es importante no olvidar que los edificios están diseñados para las personas, y estas personas tienen que sentirse cómodas dentro de los mismos. El confort térmico está ligado al clima al cual el edificio está sometido. Estas condiciones meteorológicas afectan en gran medida al confort térmico de sus ocupantes. Resulta de una importancia máxima entender bajo que condiciones los usuarios alcanzan altos niveles de confort térmico, esto ayudará a averiguar que estrategias de diseño serán las más eficaces para mantener y mejorar dicho confort.

Los edificios energéticamente eficientes solamente son eficaces cuando los ocupantes de dichos edificios experimentan condiciones ambientales adecuadas. Si los usuarios no se encuentran confortables, entonces van a necesitar medios alternativos como calefactores o unidades de aire acondicionado portátiles que resultan ser sustancialmente menos eficientes que los sistemas centralizados de climatización. El confort térmico es difícil de medir, ya que es altamente subjetivo. Depende de la temperatura del aire, humedad, temperatura radiante, velocidad del aire, la actividad metabólica y los niveles de vestimenta, además, cada individuo experimenta estas sensaciones de manera distinta según su fisiología y estado. Según la norma 55-2013 de la *American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers* (ASHRAE) [10], el confort térmico se define como "aquella condición mental que expresa satisfacción con el ambiente térmico y es evaluada subjetivamente". También conocido como el confort humano, el confort térmico es la satisfacción de los ocupantes con las condiciones térmicas de su alrededor y es esencial tenerlo en cuenta en el diseño o rehabilitación de un edificio.

Además, la temperatura de la piel no es uniforme en todas las áreas del cuerpo. Hay variaciones en diferentes partes del mismo que reflejan las variaciones en el flujo sanguíneo y la grasa subcutánea. La capacidad aislante de la ropa también tiene un importante efecto sobre el nivel y la distribución de temperatura de la piel. Por lo tanto, la sensación térmica en cualquier área de la piel dependerá de la hora, la ubicación y la vestimenta, así como la temperatura del entorno.

Los seis factores, anteriormente nombrados, a tener en cuenta a la hora de diseñar pensando en el confort térmico son los siguientes:

- La tasa metabólica (Met): Energía generada por el cuerpo humano.
- Aislamiento de la vestimenta (Clo): La cantidad de aislamiento térmico que la persona está llevando mediante su vestimenta.
- Temperatura del aire: Temperatura del aire que rodea al ocupante.

- Temperatura radiante: El promedio de todas las temperaturas de las superficies que rodean un ocupante.
- Velocidad del aire: Rango de movimiento de aire en función del tiempo.
- Humedad relativa: Porcentaje de vapor de agua en el aire.

Los factores ambientales incluyen la temperatura, la temperatura radiante, humedad relativa y velocidad del aire. Los factores personales son el nivel de actividad (tasa metabólica) y la vestimenta. El confort térmico se calcula como un balance de energía de transferencia de calor. La transferencia de calor por radiación, convección y conducción se equilibra con la tasa metabólica del ocupante. La transferencia de calor se produce entre el medio ambiente y el cuerpo humano. Si el calor que pierde un individuo es mayor que el calor que recibe, la percepción térmica es "frío". Si el calor que recibe el individuo es mayor que el calor que pierde, la percepción térmica es "calor".

Un método para describir el confort térmico fue desarrollado por Ole Fanger [120], este método se conoce como opinión media pronosticada o *Predicted Mean Vote* (PMV) y el porcentaje estimado de disconformidad o *Predicted Percentage of Dissatisfied* (PPD).

La opinión media pronosticada (PMV) se refiere a una escala térmica que va desde “mucho frío” (-3) a “mucho calor” (3), desarrollado originalmente por Fanger [120] y posteriormente adoptado en el estándar ISO 7730 [121]. Los datos originales se recogieron sometiendo un gran número de personas (varios miles de soldados israelíes) a diferentes condiciones ambientales dentro de una cámara climática y haciéndoles seleccionar una opción en la escala anteriormente citada para describir su sensación de confort. De esta manera, a partir de los resultados se desarrolló un modelo matemático de la relación entre todos los factores ambientales y fisiológicos considerados. En el resultado se muestra el tamaño de cada uno de los factores de confort térmico a través de los principios del balance térmico, y esto genera la escala de valores mostrada en la tabla 13.

Tabla 13. Escala de valores de la opinión de la sensación media prevista

Valor	Sensación
-3	Mucho frío
-2	Frío
-1	Fresco
0	Neutral
1	Templado
2	Calor
3	Mucho Calor

El rango recomendable de la PMV para el confort térmico según la ASHRAE 55 [10] está entre -0,5 y 0,5 para un espacio interior.

Por otro lado, el porcentaje estimado de disconformidad (PPD) predice el porcentaje de ocupantes que sufrirán disconfort bajo las condiciones térmicas correspondientes. El PPD está en función de la PMV, dado que a medida que la PMV se aleja del valor 0 o neutral, aumenta el PPD. El porcentaje máximo de personas insatisfechas con sus condiciones de confort es del 100% y, como nunca se puede contentar a todos los usuarios en todo momento, el rango del PPD aceptable para el confort térmico según la ASHRAE 55 es inferior al 10% de personas insatisfechas para un espacio interior.

La PMV es sin duda el índice de confort térmico más utilizado hoy en día. La norma ISO 7730 "Ambientes térmicos moderados - Determinación de la PMV y PPD Índices y Especificación de las Condiciones de confort térmico" [121], utiliza los límites de la PMV como definición explícita de la zona de confort.

La ecuación de la PMV sólo se aplica a los seres humanos expuestos, durante un largo periodo de tiempo, a condiciones ambientales constantes y con una tasa metabólica también constante.

El modelo de confort térmico de Fanger utiliza para calcular la PMV la siguiente ecuación [120]:

$$PMV = [0,303e^{-0,036M} + 0,028]\{(M - W) - 3,96E^{-8}f_{cl}[(t_{cl} + 273)^4 - (t_r + 273)^4] - f_{cl}h_c(t_{cl} - t_a) - 3,05[5,73 - 0,007(M - W) - p_a] - 0,42[(M - W) - 58,15] - 0,0173M(5,87 - p_a) - 0,0014M(34 - t_a)\}$$

Con

$$f_{cl} = \frac{1 + 0,2I_{cl}}{1,05 + 0,1I_{cl}}$$

$$t_{cl} = 35,7 - 0,0275(M - W) - R_{cl}\{(M - W) - 3,05[5,73 - 0,007(M - W) - p_a] - 0,42[(M - W) - 58,15] - 0,0173M(5,87 - p_a) - 0,0014M(34 - t_a)\}$$

$$R_{cl} = 0,155I_{cl}$$

$$h_c = 12,1(V)^{1/2}$$

Donde:

e	Número de Euler (2,718)
f_{cl}	Factor de ropa
h_c	Coefficiente de transferencia de calor por convección
I_{cl}	Aislamiento de ropa [clo]
M	Rango metabólico [W/m^2] 115 en cualquier caso
p_a	Presión del vapor de aire [kPa]
R_{cl}	Aislamiento térmico de la ropa
t_a	Temperatura del aire [°C]
t_{cl}	Temperatura de superficie de la ropa [°C]
t_r	Temperatura media radiante [°C]
V	Velocidad del aire [m/s]
W	Trabajo externo (asumido como =0)

Los modelos de confort adaptable añaden un componente más humano a la ecuación. Estos asumen que, si se producen cambios en el ambiente térmico que producen incomodidad, los individuos cambiarían su comportamiento de manera que consigan volver a los anteriores niveles de comodidad. Tales acciones podrían incluir aligerar la vestimenta, la reducción de los niveles de actividad o incluso abrir una ventana o puerta. El principal efecto de este tipo de modelos adaptables es aumentar el rango de las condiciones que los diseñadores pueden considerar como aceptables, especialmente en edificios con ventilación natural, donde los ocupantes tienen un mayor grado de control sobre su ambiente térmico.

Con el fin de tener en cuenta el confort adaptable, el espacio debe tener ventanas que se abran, no disponer de ningún sistema de refrigeración, y los ocupantes deben tener una actividad metabólica baja, entre 1,0 y 1,3 Met. Además, los ocupantes tienen la opción de añadir o quitarse ropa para adaptarse a las condiciones térmicas (Tabla 14).

Tabla 14. Efecto de los comportamientos adaptables en temperaturas de confort térmico óptimo [10].

Comportamiento	Efecto
Ponerse o quitarse suéter o chaqueta	Cambios Clo $\pm 0,35$
Ropa ajustada/Ropa no ajustada	Cambios Clo $\pm 0,26$
Ponerse o quitarse collar o corbata	Cambios Clo $\pm 0,13$
Tipo de silla de oficina	Cambios Clo $\pm 0,05$
Sentado o caminando	Varía Met en $\pm 0,4$
Nivel de estrés	Varía Met en $\pm 0,3$
Intensidad de actividad	Varía Met en $\pm 0,1$
Diferentes posturas	Varía Met en $\pm 0,10\%$
Beber/comer alimento frío	Varía Met en $-0,12$
Beber/comer alimento caliente	Varía Met en $+0,12$
Ventilador de pie	Varía Vel en $+2,0\text{m/s}$
Ventilador de techo	Varía Vel en $+1,0\text{m/s}$
Ventana abierta	Varía Vel en $+0,5\text{m/s}$

Considerando todo lo anterior, y ya que uno de los objetivos de esta tesis es crear una metodología para mejorar el confort térmico de los edificios históricos, se ha realizado un estudio estadístico del grado de satisfacción del confort térmico en los dos edificios estudiados. En la creación de los tres cuestionarios preparados se ha tenido en cuenta tanto la norma 55-2003 de la ASHRAE [10] como el método Fanger asumido por la norma ISO 7730 [121]. Estas encuestas se han confeccionado para que la maquetación final ocupe una página y que fuera lo más simple posible con el fin de garantizar el mayor número de respuestas y un elevado grado de certeza.

3.3.1. Estudio Estadístico del Confort Térmico del Museo de Historia de Valencia

Durante el mismo período de tiempo que la monitorización interior y meteorológica (Agosto 2015 – Febrero 2016), se ha realizado un estudio estadístico de satisfacción subjetiva sobre el confort térmico a los visitantes del MHV mediante cuestionarios diseñados siguiendo las directrices de la norma ASHRAE 55-2013 [10] para encuestas en adultos. 330 visitantes mayores de 18

años han completado la encuesta, a lo largo de las 27 semanas, traducida en 4 idiomas (Castellano, Valenciano, Inglés e Italiano). Los cuestionarios han sido ofrecidos a los visitantes del MHV a la salida de su visita por el personal del museo. Los días y horas en los que se puede visitar el MHV son de Martes a Sábado de 09:30h a 19:00h y Domingo de 09:30 a 15:00. El número de visitantes medio alcanzan los 2.000 al mes, por regla general.

El cuestionario, como se observa en la figura 49, se compone de trece cuestiones que el visitante debe responder.

ESTUDIO DEL CONFORT TÉRMICO  UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Fecha ___/___/___
Hora: ___:___

¿Cómo has venido hasta el museo?

¿Dónde vives?

¿Eres...?  

¿Qué edad tienes?

18 31 41 51 61
30 40 50 60 ...

Valencia Otra ciudad: _____

¿Cómo vas vestido durante la visita?

Parte de arriba jersey fino jersey grueso americana

Ropa Interior medias camiseta interior

Camisetas camiseta sin mangas vestidos y camisetas de manga corta vestidos y camisetas de manga larga sudadera

Calzado zapatos o zapatillas botas

Pantalones pantalones cortos pantalones largos faldas

1 ¿Qué sensación térmica has tenido hoy en el exterior?

mucho frío frío fresco neutral


   

templado calor mucho calor

En caso afirmativo, ¿lo has usado estos últimos días?

No Sí


2 ¿Tienes calefacción y/o Aire acondicionado en casa?

3 ¿Qué sensación térmica has tenido en el interior del museo?


     

mucho frío frío fresco neutral

templado calor mucho calor

4 ¿Qué esperabas de las condiciones térmicas del museo?

  =  

más frío lo esperaba tal cual más calor

muy seco seco normal húmedo muy húmedo

¿Destacar las algún aspecto térmico en el museo? Si es así, indica cuál y dónde.

Figura 49. Cuestionario sobre el confort térmico interior en el MHV (Versión en Castellano) (Fuente: Elaboración propia).

La dos primeras preguntas son simplemente acerca de la fecha y la hora de la visita. Esta información es muy útil para poder cruzar los datos de temperatura y humedad, tanto exteriores como interiores, con las respuestas de los encuestados. Las siguientes cuestiones intentan colocar al individuo en un rango de edad, que junto al género, componen unos datos imprescindibles para conocer el metabolismo de los encuestados. Siguiendo con los valores metabólicos y siguiendo las directrices del estándar 55-2013 ASHRAE [10], se ha considerado que la tasa metabólica de los visitantes durante la visita al museo coincide con el nivel más lento de la actividad “caminando” (velocidad de 0.9m/s, 3.2Km/h, 2.0mph) por lo que da lugar a una escala de unidades metabólicas de 2.0Met, 115W/m² y 37Btu/hft² (Tabla 15). Además, también se ha considerado oportuno conocer el origen del individuo, si posee calefacción o aire acondicionado en su hogar y su utilización en los días anteriores a su visita, para valorar su adaptabilidad a las condiciones meteorológicas del lugar.

Tabla 15. Tasas metabólicas para las distintas velocidades de caminar [10].

Actividad	Unidades Met	Tasa metabólica	
		W/m ²	Btu/h·ft ²
Caminar			
0.9 m/s, 3.2 km/h, 2.0 mph	2,0	115	37
1.2 m/s, 4.3 km/h, 2.7 mph 1.8	2,6	150	48
1.8 m/s, 6.8 km/h, 4.2 mph	3,8	220	70

En cuanto al aislamiento por la vestimenta, se ha preguntado a los usuarios por las prendas de ropa que han llevado puestas durante la visita al museo. En este caso también se sigue el estándar 55-2013 de la ASHRAE [10] para formular la pregunta y dar los valores para la respuesta (Tabla 16). Con el objetivo de evitar que el cuestionario resultase demasiado extenso y poco atractivo para los visitantes, se han simplificado los valores de respuesta respecto a los valores aportados por el estándar anteriormente mencionado.

Tabla 16. Valor de aislamiento de las diferentes prendas de ropa I_{clo} [10].

Descripción de la prenda	$I_{clo}(clo)$	Descripción de la prenda	$I_{clo}(clo)$
Partes de Arriba		Pantalones	
Jersey fino	0,25	Pantalones cortos	0,06
Jersey grueso	0,36	Pantalones largos	0,24
Americana	0,44	Falda	0,23
Ropa interior		Calzado	
Medias	0,03	Zapato/Zapatilla	0,02
Camiseta interior	0,08	Botas	0,10
Descripción de la prenda		$I_{clo}(clo)$	
Camisas y Blusas			
Camisetas sin mangas		0,12	
Vestidos y camisetas de manga corta		0,19	
Vestidos y camisetas de manga larga		0,25	
Sudadera		0,35	

Ya profundizando en la opinión subjetiva de los usuarios, se ha preguntado por:

- Opinión sobre la sensación térmica o *Thermal Sensation Vote* (TSV) del ambiente térmico interior, basada de nuevo en la escala de sensación térmica de 7 puntos (mucho frío, frío, fresco, neutral, templado, calor y mucho calor) de la ASHRAE 55-2013 [10].
- Opinión sobre la sensación térmica o *Thermal Sensation Vote* (TSV) del ambiente térmico exterior, basada otra vez en la escala de sensación térmica de 7 puntos (mucho frío, frío, fresco, neutral, templado, calor y mucho calor) de la ASHRAE 55-2013 [10].
- Satisfacción de la calidad del ambiente interior o *Interior Environment Quality* (IEQ). Preguntando cuestiones acerca de la sensación de humedad, calidad del aire interior
- Expectativa del confort térmico en el interior del MHV, antes de la llegada al edificio.

Por último, se ha formulado una pregunta con respuesta abierta en caso de que el encuestado desee comentar o expresar algún aspecto del confort térmico del MHV y no haya podido hacerlo en las preguntas anteriores.

Respecto a los modelos de confort adaptable, no se han podido tener en cuenta en este estudio estadístico al no cumplir con las condiciones necesarias


para su utilización (posibilidad de ventilación natural y no disponer de ningún sistema de refrigeración).

3.3.2. Estudio Estadístico del Confort Térmico del C.E.I.P. de Villar del Arzobispo

El estudio estadístico del C.E.I.P. de Villar del Arzobispo se ha llevado a cabo también durante el mismo período de tiempo que la monitorización interior y exterior (Octubre 2015 – Enero 2016). Como en el caso anterior, se ha encuestado al personal docente mediante cuestionarios de satisfacción subjetiva del confort térmico interior, siguiendo el estándar 55-2013 de la ASHRAE [10] (con el mismo formato de encuesta explicado en el apartado 3.3.1.). Los 10 maestros (9 mujeres y 1 hombre) han respondido a la encuesta diariamente durante todos los días laborables, en horario elegido por ellos para no entorpecer su jornada laboral.

Por otro lado, se ha realizado un estudio paralelo similar con los alumnos de 1º de primaria (6-7 años). Obviamente, se ha adaptado el cuestionario a la edad de los sujetos y se tuvieron en cuenta las opiniones de los maestros encargados de guiar a los alumnos durante la realización de la misma. En este último caso, los estudiantes rellenaron las encuestas una vez por semana a elección de los maestros para no dificultar de nuevo la dinámica de las clases. Finalmente, han participado 10 maestros y 50 alumnos de primero de primaria. Al finalizar el período de investigación se han recogido un total de 369 encuestas de maestros y 180 de alumnos. En este caso, los cuestionarios se han entregado tan sólo en Castellano al no haber ningún Valenciano hablante entre los alumnos y maestros. En su totalidad el centro alberga a 120 alumnos de entre 3 y 6 años, y 13 maestros entre personal a tiempo parcial y completo. Los días en los que el colegio está operativo se corresponden con calendario escolar de la Conselleria de Educació de la Generalitat Valenciana para el curso 2015-16, y su horario es de 09:30h a 16:30h.

La encuesta que han realizado los maestros se muestra en la Figura 42, y consta de las mismas trece preguntas que el cuestionario del estudio estadístico del MHV (Figura 50).







UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Fecha ____/____/____

Hora: ____:____







¿Cómo has venido hasta la escuela?







¿Cómo vas vestido/a durante tu jornada?

<p>Ropa Interior</p> <p><input type="checkbox"/> Medias</p> <p><input type="checkbox"/> Camiseta interior</p> <p>Camisetas y Blusas</p> <p><input type="checkbox"/> Camiseta o vestido sin mangas</p> <p><input type="checkbox"/> Camiseta o vestido de manga corta</p> <p><input type="checkbox"/> Camiseta o vestido de manga larga</p> <p><input type="checkbox"/> Sudadera</p>	<p>Parte de arriba</p> <p><input type="checkbox"/> Jersey fino</p> <p><input type="checkbox"/> Jersey grueso</p> <p><input type="checkbox"/> Americana</p> <p>Pantalones</p> <p><input type="checkbox"/> Pantalones cortos</p> <p><input type="checkbox"/> Pantalones largos</p> <p><input type="checkbox"/> Falda</p>	<p>Calzado</p> <p><input type="checkbox"/> Zapatos</p> <p><input type="checkbox"/> Botas</p> <p>¿Alguna prenda adicional?</p> <p>_____</p> <p>_____</p> <p>_____</p>
--	--	--




¿Qué sensación térmica has tenido hoy en el exterior?

¿Qué sensación térmica has tenido en el interior de la escuela?













¿Qué esperabas hoy de las condiciones térmicas de la escuela?






Más frío
Lo esperaba tal cual
Más calor

¿Cómo te ha parecido el ambiente en el interior de la escuela?









Muy húmedo
Húmedo
Normal
Seco
Muy seco

¿Estás satisfecho/a con la calidad del aire en la escuela?

¿Tienes calefacción y/o aire acondicionado en casa?

En caso afirmativo, ¿lo has utilizado estos últimos días?

SÍ

NO

¿Destacarías hoy algún aspecto térmico en la escuela? Si es así, indica cuál y dónde.

Figura 50. Cuestionario sobre el confort térmico interior en el C.E.I.P. Fabián y Fuero versión maestros (Fuente: Elaboración propia).

Los estándares sobre el confort térmico como ISO 7730 [121], ASHRAE 55 [10] y a nivel europeo la norma EN 15251 [122] están basados en adultos como sujetos de estudio. Estas normativas ofrecen valores de confort térmico para entornos docentes, asumiendo que los condicionantes del confort térmico son similares tanto para adultos como para niños. Sin embargo, factores como la tasa metabólica, la vestimenta o el nivel de actividad pueden resultar diferencias importantes a la hora de percibir las condiciones ambientales óptimas. Además, los alumnos de tan cortas edades tienen una limitada adaptación al entorno térmico interior durante las clases, ya que no se les permite abrir o cerrar ventanas, o ajustar su nivel de actividad. Por lo tanto, no se puede asegurar que los valores de confort térmico aplicables para adultos sean también los adecuados para el confort o el comportamiento de niños.

Con el objetivo de evaluar el confort térmico de los alumnos se ha diseñado un cuestionario de satisfacción térmica subjetiva. Por otro lado y como se ha comentado anteriormente, resulta obvio que los alumnos de 6 años no serían capaces de responder a la encuesta destinada a adultos, por lo que se ha creado una encuesta totalmente adaptada a los alumnos de estas edades (Figura 51). Para ello se ha contado con la opinión de los docentes-tutores que han guiado a los alumnos durante la realización de los cuestionarios.

En dicha encuesta se encuentran preguntas acerca de:

- La opinión de la sensación térmica o Thermal Sensation Vote (TSV) de los encuestados acerca del ambiente térmico interior, basado en la escala de sensación térmica de 7 puntos de la ASHRAE (mucho frío, frío, fresco, neutral, templado, calor y mucho calor).
- La opinión de la preferencia térmica o Thermal Preference Vote (TPV) basado en la escala de sensación térmica de 7 puntos de la ASHRAE (mucho más frío, más frío, un poco más frío, sin cambio, un poco más de calor, más calor y mucho más calor).
- La sensación de confort.

- Información de la vestimenta (si los alumnos llevaban jersey o sudadera en el momento de responder la encuesta).
- La sensación de cansancio.
- La actividad que los alumnos han realizado antes del cuestionario.

Para la evaluación de la opinión de la sensación térmica (TSV) se continuó utilizando la escala del estándar 55 de la ASHRAE [10] que se utilizó en los estudios con adultos, sin embargo, esta escala ha sido adaptada debido a las recomendaciones de los docentes. Las respuestas “Fresco” “Templado” y “Neutral” se han sustituido por “Un poquito más frío”, “Un poquito más de calor” y “Ni frío ni calor”, respectivamente. Como se puede apreciar en la tabla 17, para la evaluación de la opinión de la preferencia térmica (TPV) se ha utilizado también una escala de 7 puntos en lugar de la comúnmente utilizada de 3 puntos. La razón de esta modificación ha sido facilitar la comparación con la opinión de sensación térmica (TSV).

Tabla 17. Escalas de TSV y TPV utilizadas en el cuestionario.

Escala TSV	Escala TPV
(+3) Mucho calor	(+3) Mucho más calor
(+2) Calor	(+2) Más calor
(+1) Un poquito de calor	(+1) Un poquito más de calor
(o) Ni frío ni calor	(o) Sin cambio
(-1) Fresco	(-1) Un poco más de frío
(-2) Frío	(-2) Más frío
(-3) Mucho frío	(-3) Mucho más frío

Los alumnos no fueron preguntados por la calidad del aire o la humedad como se hace en la mayoría de las encuestas en adultos, porque los maestros pensaron que estas preguntas eran demasiado difíciles de entender para niños de 6 años. Además, las encuestas no han incluido cuestiones acerca de la vestimenta que los alumnos llevaban durante sus respuestas ya que se hubiera necesitado demasiado tiempo para realizar la encuesta y los niños no estarían concentrados durante tanto tiempo. Tras conversar con los maestros, se ha decidió incluir una pregunta de respuesta simple sobre si los alumnos llevaban jersey o sudadera. Este factor modifica en gran medida su aislamiento y es uno de las limitadas acciones que tienen para adaptarse al ambiente interior.

Fecha ____/____/____

Hora ____:____

1) Yo soy:



2) Tienes...

Mucho frío

Frío

Un poquito
de frío

Ni frío ni
calor

Un poquito
de calor

Calor

Mucho calor

3) Ahora mismo en la clase...

Me gustaría que hiciera mucho más frío..... 

Me gustaría que hiciera más frío..... 

Me gustaría que hiciera sólo un poquito más de frío..... 

Me gusta como está.....

Me gustaría que hiciera sólo un poquito más de calor..... 

Me gustaría que hiciera más calor..... 

Me gustaría que hiciera mucho más calor..... 

4) ¿Estás a gusto ahora mismo?



SÍ

NO



5) ¿Llevas un jersey o sudadera ahora mismo?

SÍ

NO

6) ¿Estás cansado ahora mismo?



Muy cansado



Un poquito cansado



No estoy cansado

7) ¿Qué hacías hace media hora?



Actividades en clase (leer, escribir, etc.....)



Educación Física.....



Jugar/correr en el recreo.....



Descansar en el recreo.....



Comer sentado.....

Figura 51. Cuestionario sobre el confort térmico interior en el C.E.I.P. Fabián y Fuero versión alumnos (Fuente: Elaboración propia).

3.4. Modelizaciones

En este apartado se explica el proceso de simulación energética de los dos edificios elegidos como casos de estudio, los cuales han sido reconstruidos como modelos virtuales. Como es bien sabido, el trabajo con programas de simulación energética resulta muy complejo, esto incluye la modelización y la construcción de los modelos, la caracterización e introducción de los materiales, e incluso la interpretación de los resultados obtenidos mediante dicha simulación. Por lo tanto, el objetivo es comprobar la fiabilidad de estos resultados, comparándolos a su vez con las medidas reales con el fin de contrastar la información obtenida en ambos procesos.

La selección de los programas de simulación se ha basado en la experiencia de los últimos años, durante las diferentes estancias de investigación. El programa Revit (de Autodesk) ofrece una aproximación conceptual al diseño del edificio y es capaz de realizar simulaciones energéticas completas, como estudios solares y de ventilación.

Para la simulación principal se ha utilizado el programa Designbuilder cuyo motor de cálculo es EnergyPlus, el cual permite entre otros, el cálculo de demandas de calefacción y refrigeración mediante el método de Balance Térmico aprobado por la ASHRAE e implementado por EnergyPlus. EnergyPlus ha sido diseñado por el Departamento de Energía de los Estados Unidos de América o "*Department of Energy*" (DoE).

Hasta hace relativamente poco tiempo, a la hora de realizar la simulación energética de un edificio se recomendaba modelizarlo tridimensionalmente en algún programa de diseño como AutoCAD o 3D Studio Max, para más tarde importarlo al programa de simulación elegido. Recientemente, y desde la aparición del programa Revit, se han conseguido fusionar las dos herramientas en una sola para realizar la modelización y la simulación energética en un mismo entorno. Asimismo, en el caso de necesitar utilizar otro programa complementario a Revit, la inmensa mayoría de estos software aceptan importaciones desde este programa. Por estas razones se ha

considerado modelizar los edificios en este programa para facilitar la gestión de archivos y evitar errores geométricos en la exportación.

El procedimiento de trabajo en una modelización se compone generalmente de dos pasos:

- La construcción o modelado de un modelo simplificado lo más próximo posible a la configuración constructiva del edificio (envolvente, materiales, etc.).
- El análisis individualizado de los aspectos más importantes que afectan en mayor medida al proceso de la simulación energética (Meteorología, utilización, etc.).

El objetivo principal de una simulación energética es conseguir un comportamiento energético lo más parecido posible al edificio real, ya que es prácticamente imposible que se consiga un funcionamiento igual.

Previamente al desarrollo del modelo, es necesario describir los parámetros y datos necesarios para el desarrollo de la simulación:

- Localización.
- Condiciones ambientales internas de diseño. La temperatura interior del bulbo seco y la humedad relativa, necesarias para el cálculo demandas energéticas. Con ellas se define una temperatura de confort así como la temperatura operativa, que va en función de la temperatura del aire, temperatura radiante y velocidad del aire.
- Condiciones ambientales exteriores. Conocer la temperatura exterior de bulbo seco y la humedad relativa del ambiente son también esenciales para el cálculo de la demanda energética.
- Infiltración y ventilación. Es importante conocer los valores de aire circulando en el interior del edificio, tanto intencionada (ventilación) como desintencionadamente (infiltración). La magnitud de estos valores de flujo de aire debe ser comprendida para estimar adecuadamente la demanda de energía. La ventilación puede ser natural o forzada, y una

buena utilización de la ventilación puede reducir hasta en un 50% la demanda energética de un edificio.

- Ganancias internas: Estas pueden generar calor y modificar las demandas tanto de refrigeración como de calefacción. Se pueden clasificar en dos:
 - Ocupación. La densidad de personas por metro cuadrado en un recinto.
 - Equipos. Luminarias, equipos de oficina, electrodomésticos y motores eléctricos.
- Caracterización de la envolvente. Las propiedades de los materiales utilizados en la construcción de un edificio son fundamentales para determinar su comportamiento energético. Se pueden dividir también en dos categorías:
 - Fundamentales. Los parámetros relacionados con el material e invariables (densidad, calor específico, conductividad térmica y resistencia, absorptividad, emisividad, etc.).
 - Derivados. Los generados por las diferentes composiciones de los cerramientos (transmitancia, desfase térmico, factor de amortiguación térmico, etc.).
- Geometría del edificio. La superficie y el volumen son factores básicos en el comportamiento energético de un edificio, y de ellos depende en gran medida la relación de la construcción con el clima que lo rodea. Respecto a la superficie de un edificio, cuanto mayor superficie más capacidad para intercambiar calor entre exterior e interior. Por su lado el volumen del edificio está directamente relacionado con la capacidad para almacenar energía; a mayor volumen, mayor capacidad para almacenar calor.

Otro de los factores clave para una simulación precisa del comportamiento energético de los edificios, son los datos aportados por los archivos climáticos. Los datos recogidos de las estaciones meteorológicas son tratados, posteriormente compilados y reunidos en una base de datos que dan lugar a un

período meteorológico concreto que incluye datos horarios de diversos parámetros medioambientales. El formato estándar más comúnmente utilizado es el llamado TMY2 (*Typical Meteorological Year 2*), utilizado también por la ASHRAE. Para la creación del informe meteorológico de una localidad, se necesitan los datos meteorológicos horarios de al menos 10 años. Más tarde, son analizados con el fin de determinar los valores medios de cada mes. El primer y último día de cada mes, son modificados para hacer más suave las transiciones de un mes a otro. Los archivos TMY2, son las bases de datos que están disponibles en la mayoría de las localidades del mundo.

Los diferentes programas de simulación usan distintas extensiones y formatos de archivos climáticos, incluyendo todos ellos un programa de conversión capaz de traducir el archivo a TMY2. Normalmente, un archivo climático incluye temperatura de aire seco, temperatura de bulbo húmedo, humedad relativa, presión atmosférica, velocidad del viento, dirección del viento, radiación directa, radiación difusa, radiación global y radiación horizontal infrarroja. Además, cada localidad es definida por su longitud, latitud y por su altura sobre el nivel del mar.

Los archivos climáticos usados por Revit y DesignBuilder (extensión Energy Plus/ESP-r (E/E) y EPW), están basados en el TMY2, pero han sido rediseñados para facilitar una mejor visualización de los datos, utilizando generalmente un formato de lectura en formato *Comma Separated Values* (CSV). Estos archivos son tramitados a través de la Organización Mundial Meteorológica (World Meteorological Organization), por los diferentes países y regiones. Los datos para España son desarrollados hoy día por dos fuentes o institutos. Los *Spanish Weather for Energy Calculations* (SWEC) desarrollados por la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de la Universidad de Sevilla y los *International Weather for Energy Calculations* (IWEC) desarrollados por la ASHRAE. En este caso, no han sido necesarios ninguno de ellos ya que debido a la monitorización meteorológica llevada a cabo en ambas localizaciones, se han conseguido datos más precisos para las simulaciones.

La utilidad de los programas informáticos de simulación energética, reside por una parte en abordar la simulación energética como herramienta de predicción y de investigación, y por otra la comprobación de las características establecidas previamente por la experiencia y con los cálculos realizados en su caso.

Se ha tratado de estudiar, por tanto, la caracterización energética, por medio de simulaciones por ordenador, de los dos edificios históricos seleccionados.

3.4.1. Modelización del Museo de Historia de Valencia

Se ha reconstruido el edificio que alberga el Museo de Historia de Valencia en tres dimensiones en el programa Revit de Autodesk (BIM). Desde esta plataforma se puede exportar a prácticamente todos los programas de simulación necesarios para un estudio energético completo, aunque el programa de simulación principal ha sido DesignBuilder (con motor de cálculo EnergyPlus).

Primero se ha realizado el modelado geométrico tridimensional mediante operaciones de extrusión, corte, unión, etc. (operaciones booleanas). Además, ha sido necesario para lograr una mayor precisión la importación de planos en dos dimensiones en formato .dxf con referencias a puntos y planos gráficos (jpg y pdf), como base para el trazado del modelo (figura 52). Una vez conseguida la geometría del edificio, se ha pasado a modelar la envolvente térmica definiendo los cerramientos por capas, características térmicas y la calidad de los mismos. Este paso ha resultado de especial dificultad ya que el cerramiento no disponía de capas bien delimitadas. Además, se han definido la cubierta y las puertas (el edificio no dispone de ventanas). Asimismo se han tenido en cuenta aspectos como las infiltraciones, la operatividad de las puertas y la tasa de renovaciones por hora.

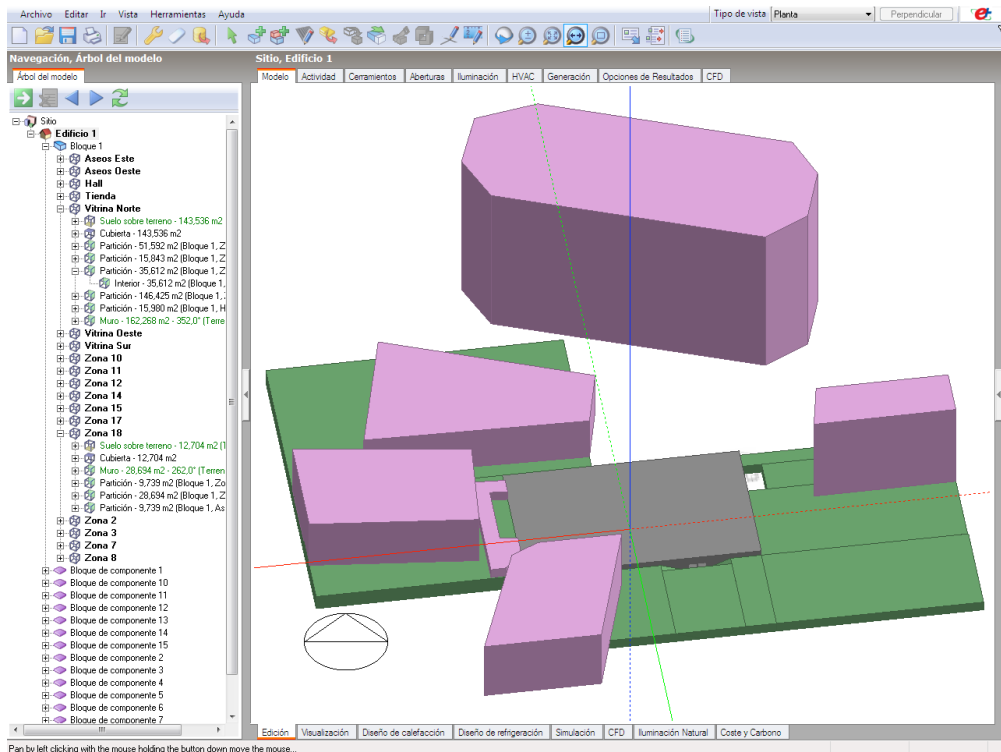


Figura 52. Interfaz del modelado del Museo de Historia de Valencia.

La utilización de cada zona y su traducción al modelo tridimensional han sido importantes a la hora de optimizar el modelado. Se definió la ocupación con los datos reales de visitantes (8434 visitantes), la tasa metabólica media y los horarios de apertura. Por otro lado, se han definido las consignas de temperatura a mantener en cada zona para controlar la calefacción, la refrigeración y la ventilación mecánica (entre 21°C - 24°C de temperatura y 40%-70% de humedad relativa) . La definición de las cargas internas y equipos informativos también han sido tenidos en cuenta.

Respecto a la iluminación, debido a la gran cantidad de diferentes puntos de luz, se ha idealizado la instalación para agilizar los cálculos, aunque manteniendo la potencia por superficie y la iluminancia de cada zona del edificio.

Ya pasando al modelado de los sistemas de climatización y de Agua Caliente Sanitaria (ACS), se ha optado por definir el sistema como primario de enfriadora alimentada por torre y caldera, la cual abastece también el ACS.

Por último, se ha intentado recrear el entorno del edificio para conseguir un análisis completo de sombreado y ventilación natural (figura 53).

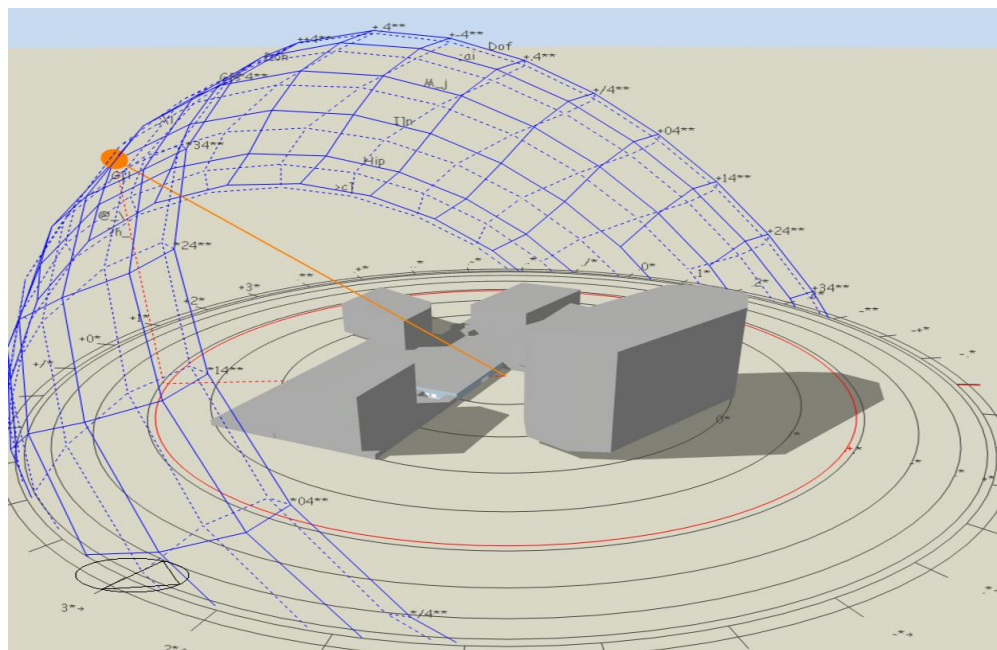


Figura 53. Modelado del entorno del Museo de Historia de Valencia.

3.4.2. Modelización del C.E.I.P. de Villar del Arzobispo

Respecto a la modelización del centro docente del CEIP Fabián y Fuero, las directrices generales son muy similares a las del caso anterior, aunque con las particularidades propias de un edificio diferente. Se ha vuelto a construir la geometría en Revit de Autodesk (BIM) ya que es una herramienta en la que es sencillo modelar y, como se ha comentado anteriormente, la mayoría de programas de simulación leen sus archivos. Igual que en el MHV, la simulación principal se ha realizado con el software DesignBuilder (figuras 54 y 55).

Una vez teniendo la geometría se ha definido la envolvente del edificio, introduciendo las características de los cerramientos como resistividad térmica, masa térmica, etc. Este aspecto ha resultado de especial importancia por la gran inercia térmica del edificio. Asimismo, se solucionan los huecos, acristalamientos (factor solar, transmitancia térmica), carpinterías, lamas, voladizos, infiltraciones de todos los elementos y la ventilación natural.

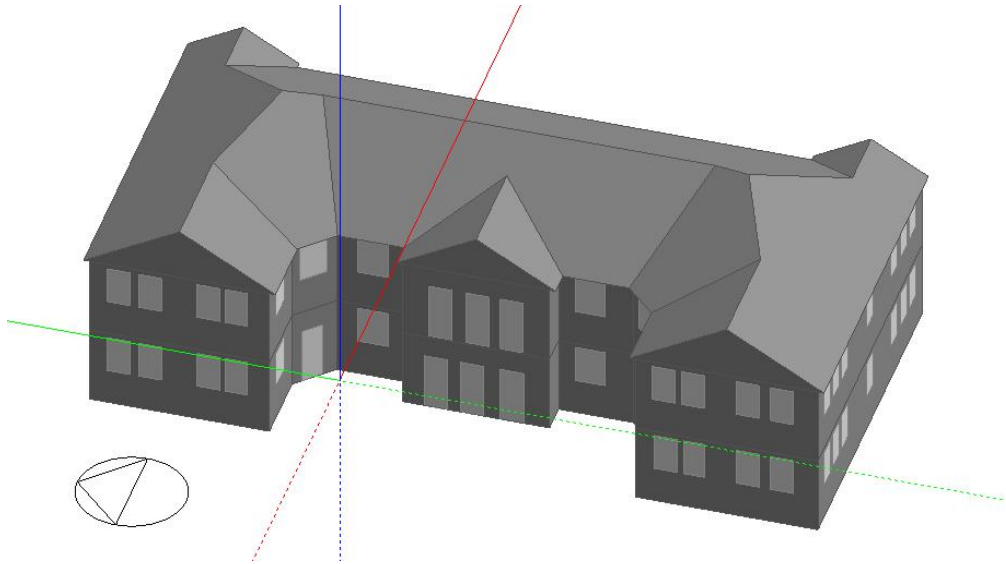


Figura 54. Interfaz del modelado del CEIP.

En un edificio como el de este centro docente con un horario tan establecido y con una ocupación muy alta en algunas de las zonas, es importante introducir estas ganancias internas. Además, se ha tenido en cuenta la iluminación y los equipos, como proyectores y ordenadores.

Por otro lado, las consignas de activación de la calefacción están preestablecidas a 20°C - 21°C y por lo tanto han sido sencillas de introducir en el modelo. Asimismo, la ventilación natural a través de las ventanas ha resultado un complicada de definir, y se ha optado por preguntar a los docentes y sus hábitos.

Como se ha descrito en el apartado 3.1.2. el sistema de calefacción es una caldera de gasoil que alimenta radiadores distribuidos por toda el centro, y de esta manera se ha definido en el programa de simulación. No se ha introducido

ni ventilación mecánica ni instalación de aire acondicionado al no disponer el centro de ellos.

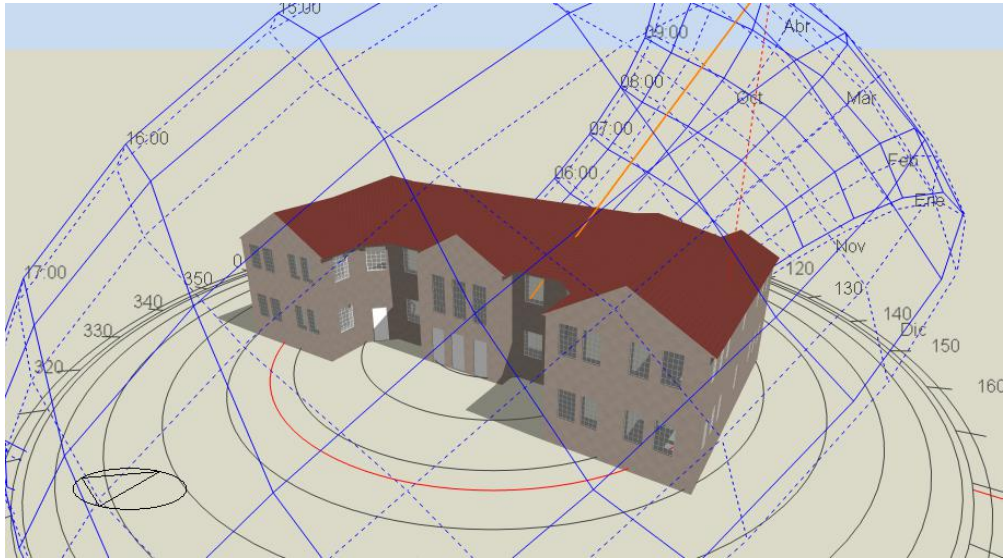


Figura 55. Modelado del entorno del CEIP.



Capítulo 4. Resultados de los Casos de Estudio

En este capítulo se analizan los resultados obtenidos, tanto en la auditoría de los edificios como en las simulaciones y en sus correspondientes estudios estadísticos. También se muestran los datos recogidos de las dos estaciones meteorológicas y se discute las monitorizaciones de ambos edificios. Los resultados de las simulaciones son ordenados por edificio. En la última parte del capítulo se analizan los resultados para ofrecer estrategias que favorezcan tanto el confort térmico de los ocupantes como el ahorro energético, por supuesto manteniendo el patrimonio histórico inalterado.

4.1. Museo de Historia de Valencia

4.1.1. Monitorización Meteorológica e Interior

La monitorización medioambiental de la ciudad de Valencia durante el período de estudio muestra temperaturas máximas cercanas a los 30°C durante los meses de agosto y septiembre de 2015 y mínimas alrededor de 10°C en los meses de enero y febrero de 2016. Por otro lado, la humedad relativa registrada en la ciudad varía constantemente, sin ningún patrón aparente, con valores entre 30% y 80% (Fig. 56).

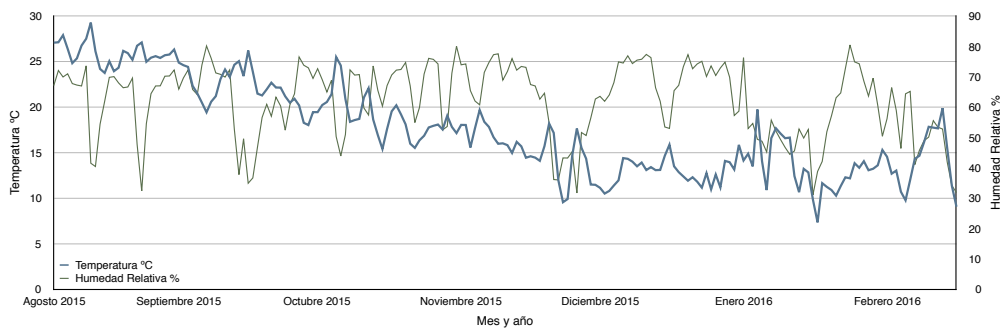


Figura 56. Temperatura del aire y humedad medias en la ciudad de Valencia durante el período de estudio.

Respecto a la radiación solar los valores son muy elevados con registros que sobrepasan los 900W/m² en los meses más cálidos y los 400W/m² en los meses más fríos. En cuanto a las precipitaciones, son tan escasas que podrían obviarse, con prácticamente 4 días de lluvia en los 7 meses de monitorización (figura 57).

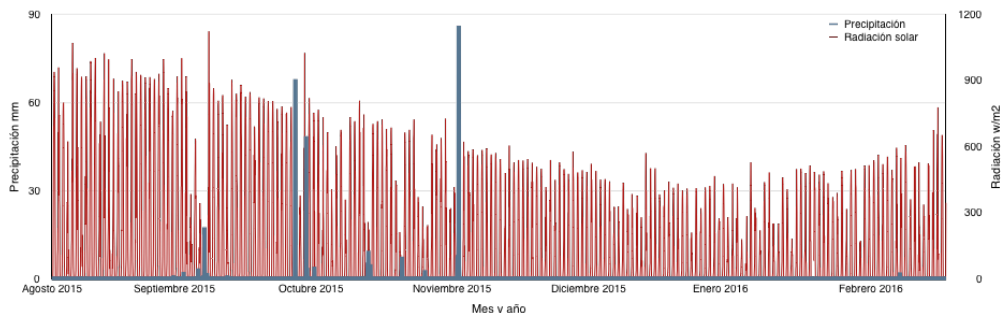


Figura 57. Precipitación y radiación solar en la ciudad de Valencia durante el período de estudio.

Respecto al análisis interior, toda la superficie del museo ha sido monitorizada mediante las doce sondas instaladas previamente. Aunque las variaciones de temperatura del aire no son demasiado grandes entre las diferentes zonas, se ha realizado un análisis independiente de cada área con el objetivo de analizar estas variaciones en las temperaturas. En la figura 58, se muestran los valores medios para cada hora del día a lo largo de todo el período estudiado para cada sonda. En este gráfico se puede apreciar cierta estabilidad de las temperaturas, a lo largo de las horas del día. Según las directrices de la dirección del museo la temperatura óptima para el interior del edificio debe estar entre 21°C y 24°C. Diez de las doce sondas se mantienen entre 21°C y 22°C, la sonda número 2 que se sitúa en la zona de la exposición temporal (cercana a la puerta principal) registra datos superiores a 23°C, y por último la sonda número 1 se encuentra alrededor de los 25°C de media. Esta sonda número 1 se encuentra en la zona de recepción del museo, en la que los trabajadores tienen situado en invierno un calefactor portátil, y en verano la puerta principal puede permitir el calor exterior al acceder al edificio, tal vez, estas pueden ser dos de las causas de esta diferencia de temperatura respecto al resto de sondas.

En esta figura 58 se puede observar que las sondas mantienen la temperatura relativamente constante, a lo largo de toda la jornada. Este comportamiento es ideal para el mantenimiento de las piezas que alberga el edificio. Obviamente, la gran inercia térmica de la construcción ayuda a esta estabilidad de temperatura interior.

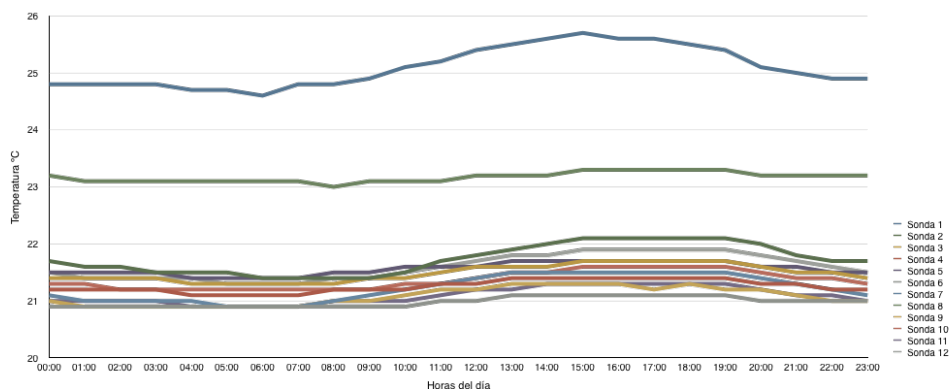


Figura 58. Variación de temperatura media del aire de las doce sondas instaladas en el Museo de Historia de Valencia durante el período de estudio.

En lo que a humedades se refiere, la dirección del museo aconseja mantener este valor en un rango entre 40%-70% para el correcto mantenimiento de las piezas alojadas en él, sin embargo, la norma 55-2013 de la ASHRAE ajusta este porcentaje a 40%-55% para el confort térmico de los visitantes. En la figura 59 se pueden observar las humedades medias en intervalos horarios durante los meses monitorizados. Se observa claramente una gran estabilidad en la humedad interior del edificio, principalmente con parámetros alrededor del 60%. Sin embargo, al igual que ocurre con los valores medios de temperatura, las sondas 1 y 2 se mantienen en valores diferentes al del resto de dispositivos. Estas dos sondas muestran lecturas entorno al 45%, lo que supone una diferencia media del 15% en relación a las otras 10 sondas.

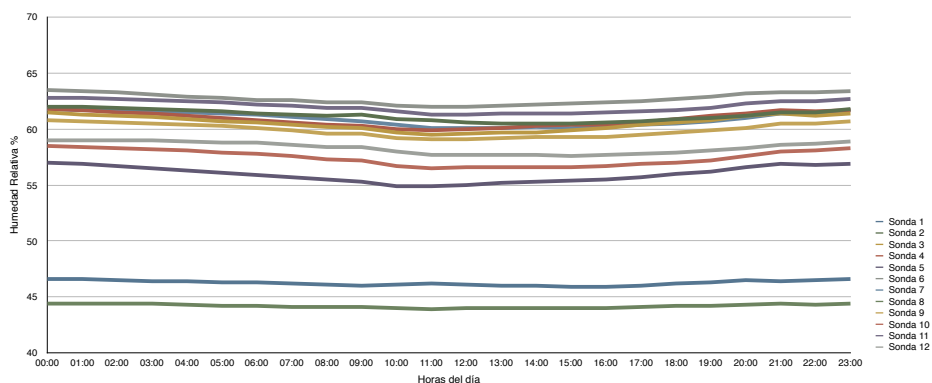


Figura 59. Variación de las humedades relativas medias de las doce sondas instaladas en el Museo de Historia de Valencia durante el período de estudio.

Las temperaturas del aire interior registradas por las doce sondas preinstaladas en el museo se muestran en la figura 60. Estos datos muestran los datos horarios recogidos durante toda la monitorización, mostrando valores que se escapan (por ambos lados) del rango recomendado de 21°C-24°C para la conservación de la exposición.

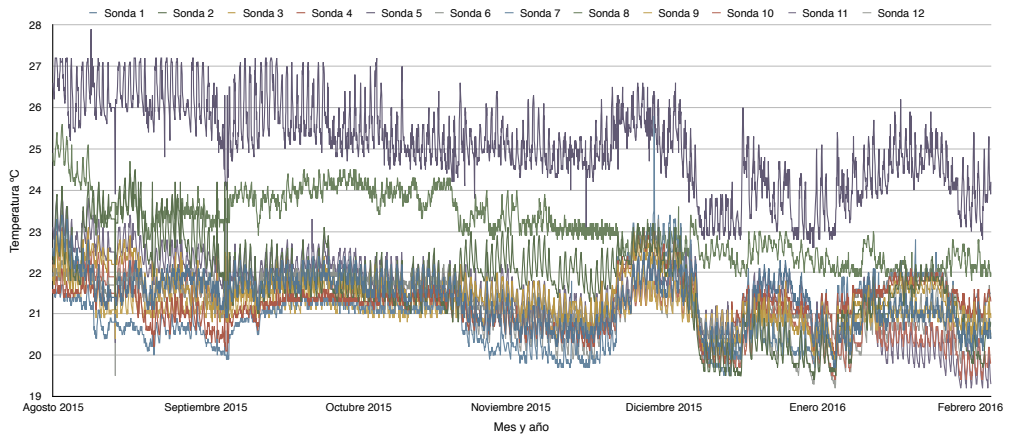


Figura 60. Temperatura del aire interior de las doce sondas instaladas en el Museo de Historia de Valencia durante el período de estudio.

En lo que se refiere a la humedad relativa en el interior del edificio, también existen picos que se han detectado fuera de los parámetros establecidos por la administración del edificio de 40%-70%. En la Fig. 61 se puede observar que durante los meses más cálidos la humedad en el interior del museo se incrementa considerablemente, alcanzando regularmente valores mayores del 70%. En cambio, en los meses más fríos, se consigue mantener la mayor parte del tiempo los parámetros de humedad dentro del rango recomendado de 40%-70%, aunque siguen apareciendo picos fuera de estos porcentajes.

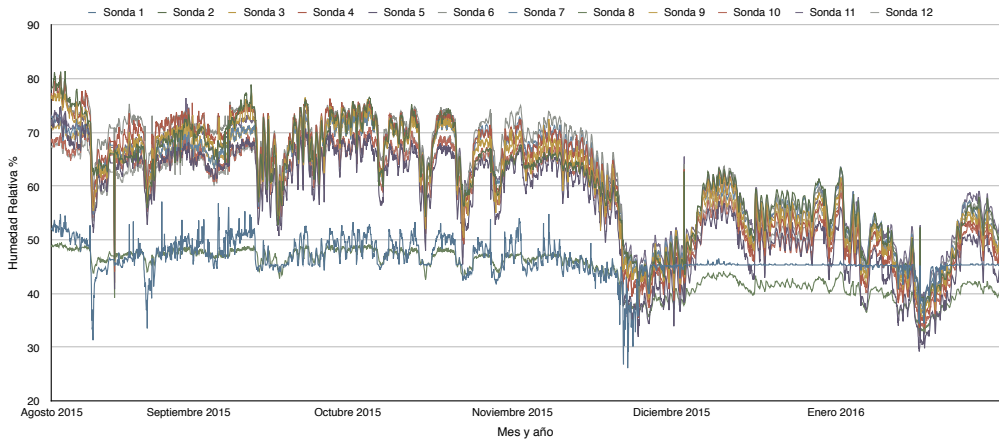


Figura 61. Humedad relativa interior de las doce sondas instaladas en el Museo de Historia de Valencia durante el período de estudio.

Con el objetivo de conseguir un análisis más detallado del comportamiento actual del edificio, se ha estudiado la respuesta del mismo durante las semanas y los días más desfavorables, tanto por bajas como por altas temperaturas. Siendo la semana más fría del 18 al 24 de enero de 2016, la cálida del 10 al 16 de agosto, asimismo, el día más frío se registró el 24 de noviembre de 2015 y el día con las temperaturas más altas fue el 14 de agosto.

Durante la semana más fría (18-24 de Enero de 2016) se sufrieron temperaturas que no superaban 6°C - 7°C durante las noches y como temperaturas máximas apenas superaban los 15°C en el centro del día (Fig. 62). Sin embargo, las sondas instaladas se mantienen con temperaturas estables, alrededor de 20°C y no registran ninguna variación influenciadas por la temperatura exterior. Sin embargo, las temperaturas de la sonda número 1, situada en la zona de recepción, sí que se ven influenciadas levemente por las temperaturas máximas de los días de esta semana.

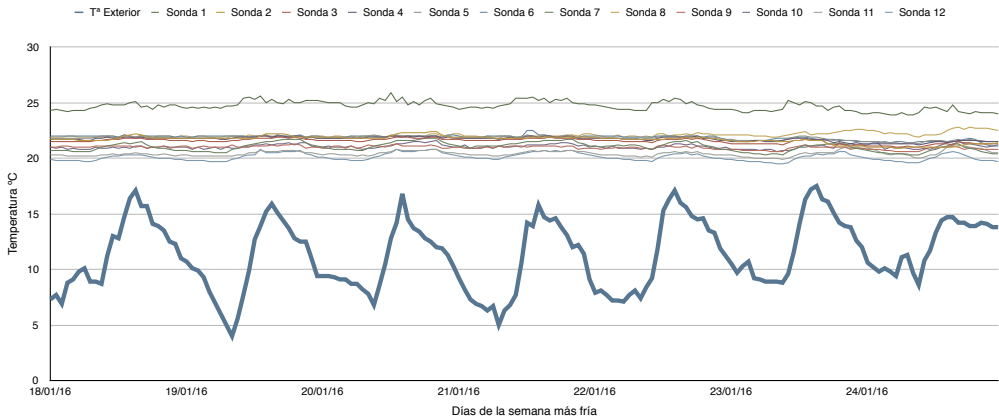


Figura 62. Temperaturas interiores y exterior de la semana más fría en el MHV durante el período de estudio.

Por el contrario, durante la semana con las temperaturas más altas (figura 63), los valores máximos alcanzan, e incluso superan en varios momentos los 30°C. Al igual que en la figura 62 las variaciones de la temperatura exterior no influyen notablemente las temperaturas interiores. Además, si se comparan las temperaturas interiores de ambas semanas, se observa una gran uniformidad en las condiciones interiores. Sin embargo, las sondas número 1 y 2 se desmarcan, casi en la totalidad de la semana, del rango de temperaturas recomendable.

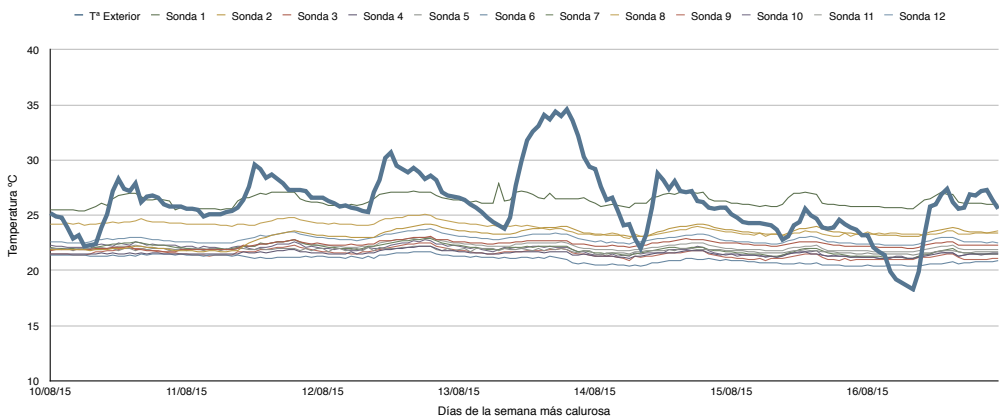


Figura 63. Temperaturas interiores y exterior de la semana más calurosa en el MHV durante el período de estudio.

Ya para finalizar, se han estudiado los días con las condiciones más extremas, siendo estos el 14 de agosto y el 24 de noviembre de 2015, los días más cálidos y fríos, respectivamente. En la figura 64 se puede apreciar la gran diferencia de temperatura entre los diferentes lugares del museo, y como el área de la puerta principal continua siendo la más cálida. La sonda número 1 registra valores entre 26°C y 27°C, los cuales son significativamente elevados a los recomendados. El resto de dispositivos se encuentran con diferencias en torno a 3°C, lo que significa que la homogeneidad de temperaturas interiores es bastante escasa. Además, también se puede observar que las temperaturas interiores no se ven influenciadas por las condiciones exteriores.

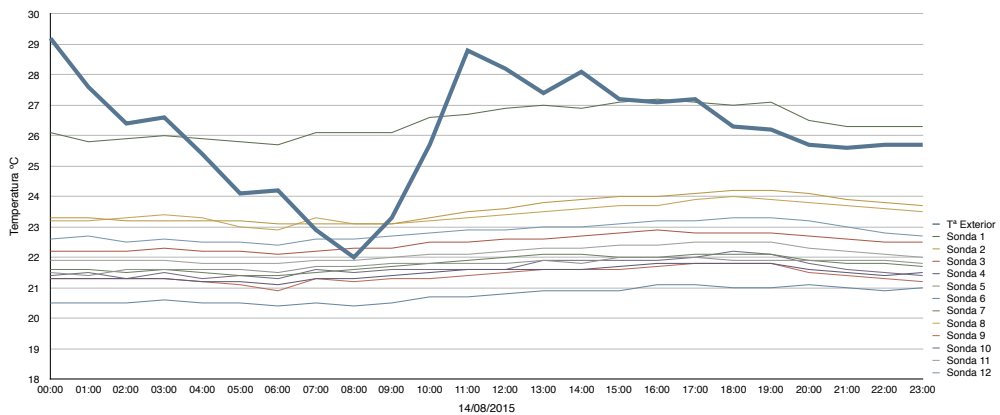


Figura 64. Temperaturas interiores y exterior del día más caluroso en el MHV durante el período de estudio.

Por último, el análisis de las temperaturas del día más frío de la monitorización muestra unos valores más homogéneos a lo largo del día, manteniéndose entre 21°C y 23°C (exceptuando la sonda número 1). Estos parámetros se encuentran dentro de las especificaciones de la dirección del museo (21°C-24°C), por lo que se aceptan como temperaturas correctas. Sin embargo, la sonda 1 vuelve a salirse de la tendencia del resto de dispositivos con valores cercanos a 27°C (Figura 65).

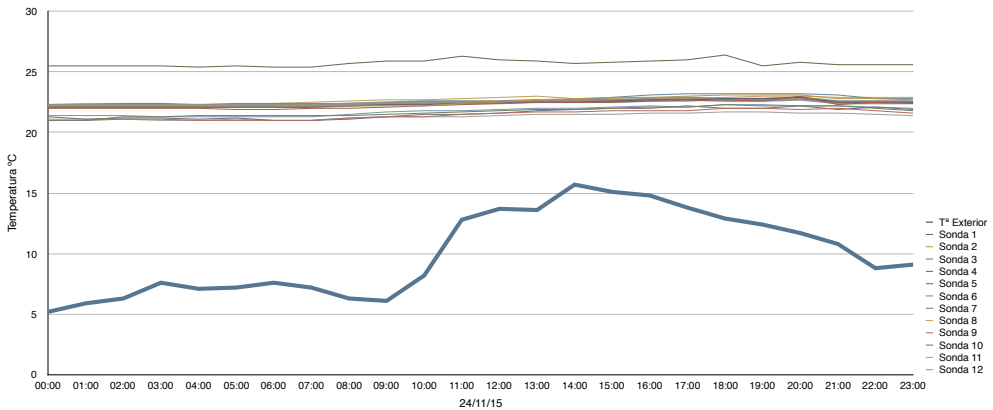


Figura 65. Temperaturas interiores y exterior del día más frío en el MHV durante el período de estudio.

Resumiendo ambas monitorizaciones, meteorológica e interior, se pueden sacar las siguientes conclusiones parciales:

- La climatología descrita por la clasificación de Köppen como suave y húmeda (verano cálido) responde perfectamente a los datos obtenidos en la monitorización con temperaturas suaves y humedades elevadas con veranos con valores relativamente altos (30°C y 80%). Asimismo, altos registros de radiación solar y despreciables precipitaciones.
- La monitorización interior, muestra que existen picos de humedades temperaturas se escapan del rango preestablecido por la dirección del museo para la conservación de las piezas expuestas. Estos valores máximos y mínimos, son lo suficientemente frecuentes para tenerlos en cuenta como un aspecto a mejorar.
- Las variaciones de la temperatura exterior no afecta notablemente a las temperaturas interiores.
- La sonda número 1 situada en la entrada principal y donde se encuentra el mostrador de recepción, no sigue la tendencia del resto de dispositivos. Tanto en verano como en invierno las temperaturas son más elevadas que en el resto del edificio. Esto se debe a que en invierno los trabajadores tienen un calefactor portátil en esa zona y en verano la

puerta principal deja entrar el calor exterior mediante grandes infiltraciones.

4.1.2. Estudio Estadístico del Confort Térmico

Los datos recopilados en las encuestas realizadas permiten conocer y valorar las opiniones de los visitantes del Museo de Historia de Valencia. El número de visitantes registrados durante el período de monitorización (Agosto 2015 – Febrero 2016) es de 8.434 personas. Se han realizado 413 encuestas, y utilizando estadística básica se ha observado que con un nivel de confianza del 95% y un error muestral del 5%, el tamaño recomendado de la muestra es de 368 según la fórmula de muestreo aleatorio simple [123] (conociendo la población):

$$n = \frac{Z^2 \cdot p \cdot q \cdot N}{N \cdot E^2 + Z^2 \cdot p \cdot q}$$

Donde:

n = tamaño de la muestra
Z = coeficiente para un nivel de confianza
p=q=0,5 al no haber estudios anteriores
E = error de la muestra
N= población

Por lo tanto al haber realizado 413 encuestas y el tamaño mínimo de la muestra es de 368, se ha aceptado el tamaño de la muestra recogida.

La población encuestada se encuentra repartida exactamente al 50% entre hombre y mujeres (figura 66), y como muestra la figura 67 el rango de edad predominante es el que comprende las edades de 18 años y 30 años con 141 encuestados (38%). Este rango está seguido por los rangos de edades de entre 31 hasta 40 años (22%), y 41 hasta 50 años (23%), con alrededor de 85 visitantes por cada rango. Por último, los visitantes comprendidos entre los 51 años y los 60

años no alcanzan los 40 (10%), y por lo que respecta a los individuos mayores de 60 años se han registrado tan sólo 24 respuestas (7%).

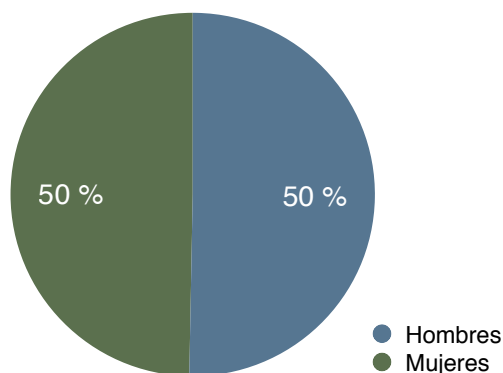


Figura 66. Porcentaje de mujeres y hombres de los visitantes encuestados en el MHV durante el período de estudio.

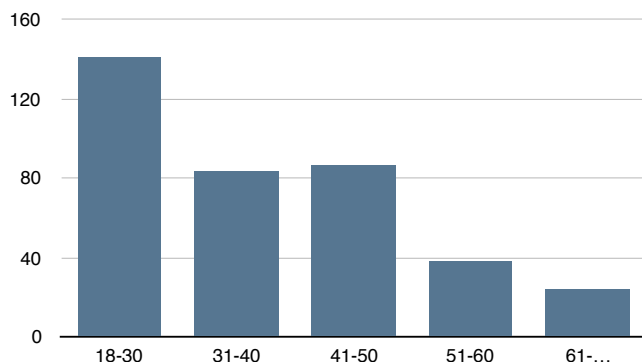


Figura 67. Cantidad de visitantes encuestados por rangos de edades en el MHV durante el período de estudio

Por otro lado, el modo más común en el que los visitantes del museo acceden a sus instalaciones es el transporte motorizado con 265 respuestas representando un 69% de los visitantes. Asimismo, caminando, es la opción que eligieron 97 personas componiendo el 25% de los encuestados. Por último, montando en bicicleta representan el 6% con 23 casillas marcadas, nadie ha respondido indicando que haya accedido al MHV corriendo (figura 67).

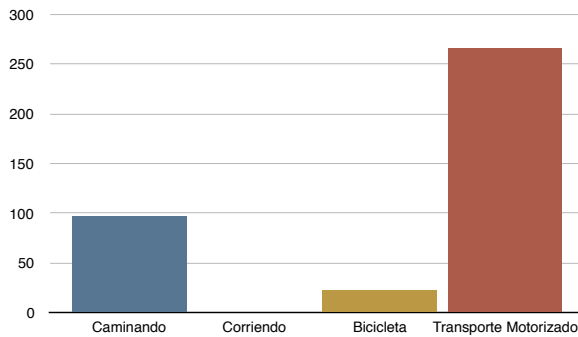


Figura 67. Cantidad de visitantes encuestados por modo de acceso al MHV durante el período de estudio.

Continuando con el origen de los encuestados, y como se aprecia en la figura 68, el 54% de ellos han contestado ser locales al contrario del 46% que resulta ser de fuera de la ciudad, incluso de origen extranjero.

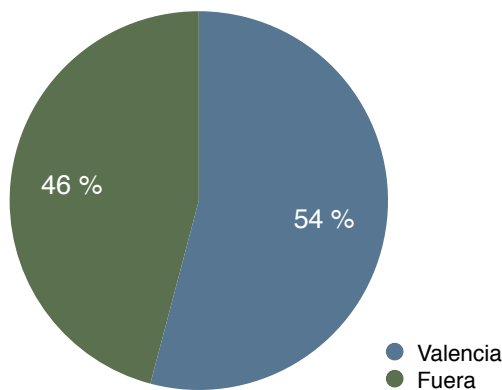


Figura 68. Porcentaje de visitantes encuestados por origen en el MHV durante el período de estudio.

Dejando a un lado las características personales de los visitantes, las opiniones subjetivas de estos revelan datos muy importantes para este estudio. Por ejemplo, la percepción de la temperatura ambiental exterior resulta de una importancia máxima para entender el coeficiente de adaptabilidad térmica. Los resultados de esta cuestión están muy repartidos centrandolo en los valores intermedios con 67 respuestas de “fresco” (17%), 59 para “neutral” (15%), 85 de “templado”(22%), 87 para “calor” (22%) y 71 para “mucho calor” (18%), dejando los valores más fríos de “frío” (4%) y “mucho frío” (1%) con tan solo 17 y 2 respuestas respectivamente (figura 69). Estas opiniones respaldan los

resultados de la monitorización medioambiental y de la clasificación de Köppen de clima mediterráneo con temperaturas suaves.

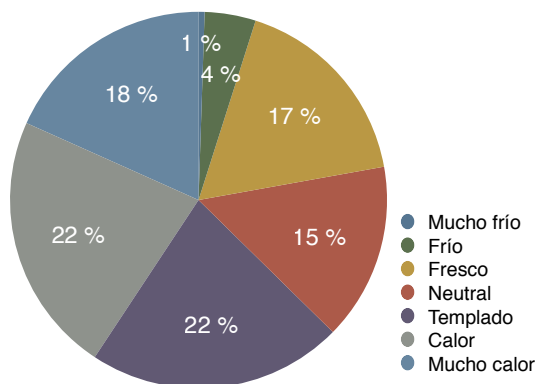


Figura 69. Porcentaje de los visitantes del MHV durante el período de estudio según su percepción del clima exterior.

Esta adaptabilidad que se comenta en el apartado 3.3.I. también debe tener en cuenta el factor fundamental que resulta el disponer (y utilizar recientemente) climatización en el hogar del encuestado. Por ello los resultados de estas dos preguntas muestran que el 74% de los visitantes (273) “no” tiene instalada climatización en sus domicilios y por el contrario el 26% han contestado que “sí” (98). De este 26% de respuestas afirmativas el 52% puso en funcionamiento el sistema de calefacción o refrigeración en los día/s anteriores a la visita al museo, por el 48% que no lo hizo (figuras 70 y 71).

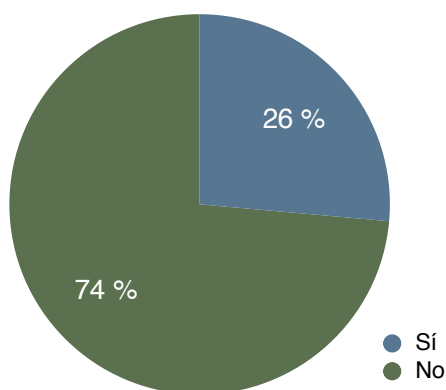


Figura 70. Porcentaje de los visitantes del MHV durante el período de estudio que disponen de aire acondicionado/calefacción en sus hogares.

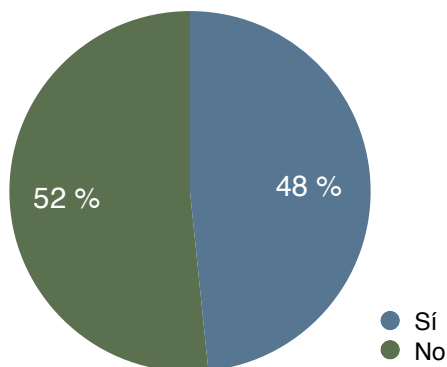


Figura 71. Porcentaje de los visitantes del MHV que respondieron afirmativamente a la posesión de aire acondicionado y/o calefacción durante el período de estudio, que utilizaron alguna de estas instalaciones en sus hogares recientemente.

Respecto a la opinión subjetiva de los visitantes del museo acerca de la temperatura interior del edificio, como muestra la figura 72, los valores “neutral” (30%) y “fresco” (35%) han resultado ser los más seleccionados junto con “templado” (14%) y “frío” (13%). Los valores “mucho frío” (5%) y “calor” (3%) han recibido 18 y 13 respuestas, respectivamente. Como última opción seleccionada ha aparecido “Mucho calor” (0%) con tan solo una respuesta. Esto muestra una satisfacción del confort interior más que aceptable, con una pequeña tendencia hacia temperaturas relativamente bajas.

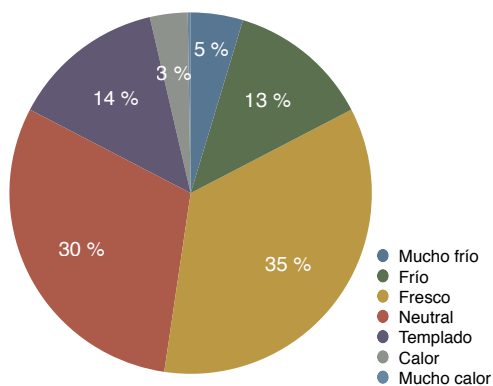


Figura 72. Porcentaje de los visitantes del MHV durante el período de estudio según su percepción de la temperatura interior del edificio.

Los visitantes fueron también preguntados sobre la expectativa que tenían sobre la temperatura interior del museo antes de acceder al edificio. Los resultados, como se muestra en la figura 73, confirmaron que la mayoría de los encuestados no se sorprendieron de la temperatura del museo (68%), sin embargo, el 21% esperaban unas temperaturas más altas de las encontradas. Por último, un 11% de los visitantes se prepararon para un ambiente algo más frío.

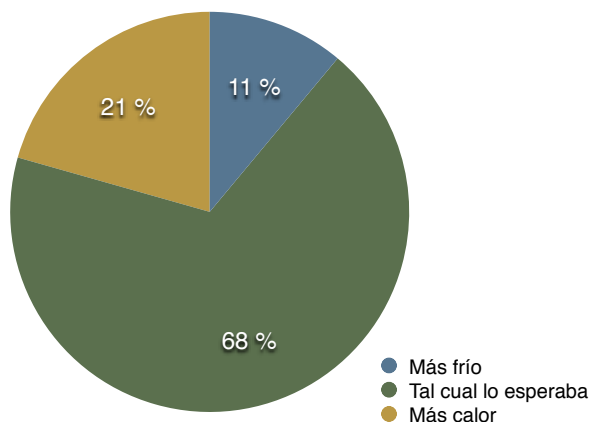


Figura 73. Porcentaje de los visitantes del MHV durante el período de estudio según su expectativa de la temperatura interior del edificio.

Por otra parte, la calidad del aire interior del edificio recibió opiniones muy positivas con 165 respuestas de “Muy bueno” (43%), 148 de “bueno” (38%) y 49 de “neutral” (13%). Los encuestados que no estuvieron satisfechos con este parámetro respondiendo “malo” (5%) o “muy malo” (2%) han tenido 20 y 6 respuestas, respectivamente (figura 74).

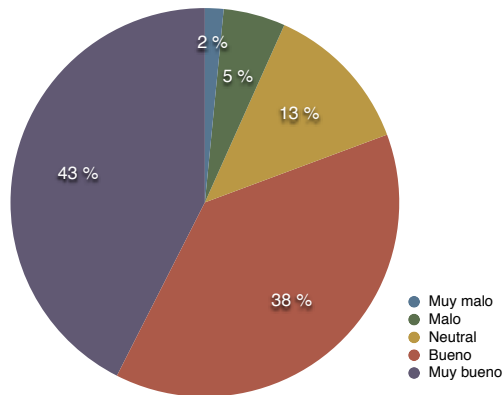


Figura 74. Porcentaje de los visitantes del MHV durante el período de estudio según su opinión sobre la calidad del aire interior del edificio.

Respecto a la humedad percibida por los visitantes al museo, la gran mayoría (81% con 312 respuestas) ha expresado niveles aceptables (“normal”), tan sólo 45 encuestados han contestado que el ambiente interior les pareció “húmedo” representando un 12%. Por último, un 5% (19 opiniones) ha contestado que el ambiente es “seco”, además de un 1% que ha declarado percibirlo “muy seco” o “muy húmedo” con 4 y 3 respuestas, respectivamente (figura 75).

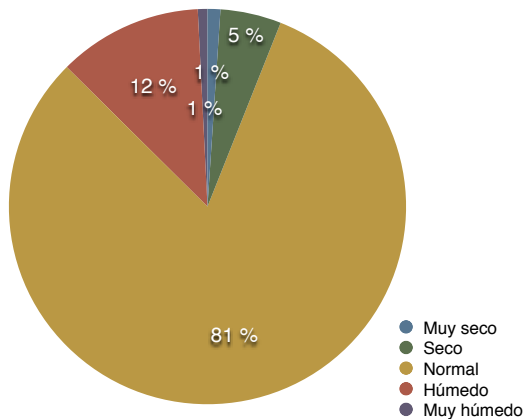


Figura 75. Porcentaje de los visitantes del MHV durante el período de estudio según su opinión sobre la humedad en el interior del edificio.

Por su lado, los empleados del museo fueron preguntados por sus impresiones acerca del confort térmico en el interior del edificio y sus

respuestas fueron todas en la misma línea. Durante el invierno tenían frío y durante el verano sufrían demasiado calor. Estos niveles de discomfort pueden deberse a la infiltración no deseada a través de la puerta principal, ya que el personal del museo se encuentra en el mostrador anexo a dicha puerta, la cual es de vidrio simple y no existe doble puerta.

A la vista de estos resultados, se pueden extraer las siguientes conclusiones parciales:

- Los visitantes al MHV se pueden dividir en un 50% mujeres y un 50% hombres, siendo el rango de edades predominante el de 18-30 años con un 38%. Asimismo, su origen también se reparte en un 50% de locales y 50% de fuera de la ciudad de Valencia.
- El transporte motorizado con un 69% es el medio más utilizado para acceder al MHV. Por lo que se ha tenido en cuenta que la tasa metabólica de la mayoría de los visitantes no es demasiado elevada.
- Los visitantes opinaron que las temperaturas exteriores son suaves en general, con algunas opiniones de mucho calor.
- Tan solo el 26% de los encuestados tiene climatización en su hogar, y de este porcentaje, solo el 48% la utilizó en los días previos a su visita.
- Un 65% de los visitantes está conforme o tiene un poco de fresco en el interior del edificio.
- El 68% esperaba la temperatura interior tal y como estaba, al contrario que un 21% que se esperaba unas temperaturas más altas.
- Un 94% de las opiniones fueron positivas respecto a la calidad del aire interior, y el 81% estaba contento con la humedad del aire, sin embargo un no despreciable 12% pensó que el ambiente interior era húmedo.

4.1.3. Simulación Energética

Después de la modelización del edificio se ha simulado el comportamiento energético del mismo obteniendo los siguiente resultados.

Los datos de confort obtenidos muestran en la figura 76 las gráficas de las distintas temperaturas del aire interior, radiante y operativa, así como la exterior. Se observan los ligeros incrementos de temperatura durante los períodos en los cuales el museo está abierto al público. Estas gráficas revelan la estabilidad de las temperaturas interiores entre los 20°C y los 25°C, sin importar las condiciones climatológicas. Asimismo, la simulación refleja también la humedad media interior en valores horarios, la cual tiene picos que se separan demasiado de los estándares marcados por la dirección delo museo (40%-70%). Además, valores horarios del valor del “*Predicted Mean Vote*” (VMP) de Fanger y horas de disconfort pueden observarse en la figura 76.

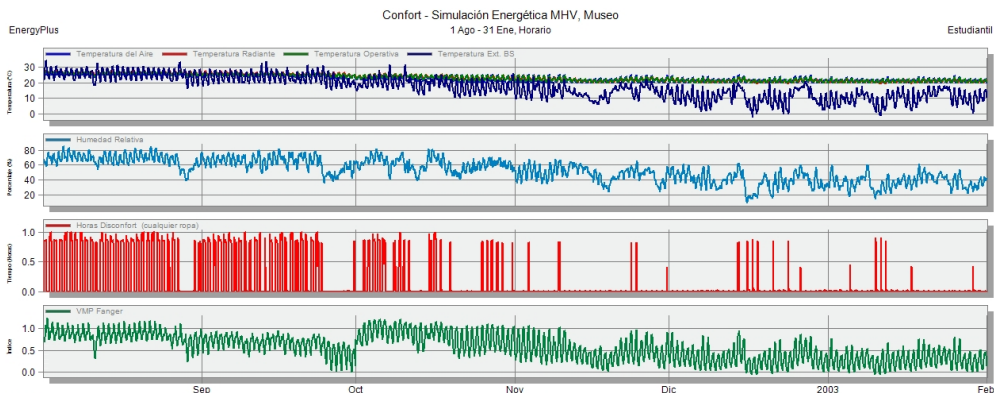


Figura 76. Temperaturas y humedades interiores, temperatura exterior, horas de disconfort y valor VMP Fanger por horas durante el período de estudio en el Museo de Historia de Valencia.

Estos cálculos de confort térmico interior, como el VMP de Fanger y las horas de disconfort basadas en el estándar 55 de la ASHRAE [10], y alcanzan exactamente el 0,56 de media las 658 horas, respectivamente. Por otro lado, las temperaturas y humedad medias se mantienen en valores correctos según la Figura 77.

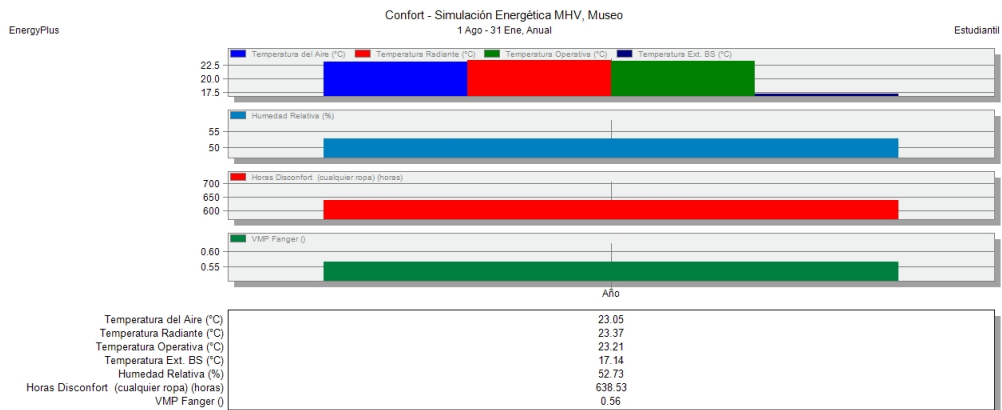


Figura 77. Temperaturas y humedades interiores medias durante el período de estudio en el Museo de Historia de Valencia.

Por su parte, las ganancias internas que tiene el edificio provienen principalmente por la iluminación, la calefacción y la ocupación. El dato de la demanda de calefacción resulta muy llamativo ya que no es la principal fuente de calor interior. Esto se puede deber a la gran superficie que el edificio tiene de cubierta que junto a la gran radiación solar de la ciudad de Valencia, no es necesaria demasiada carga de calefacción (figura 78).

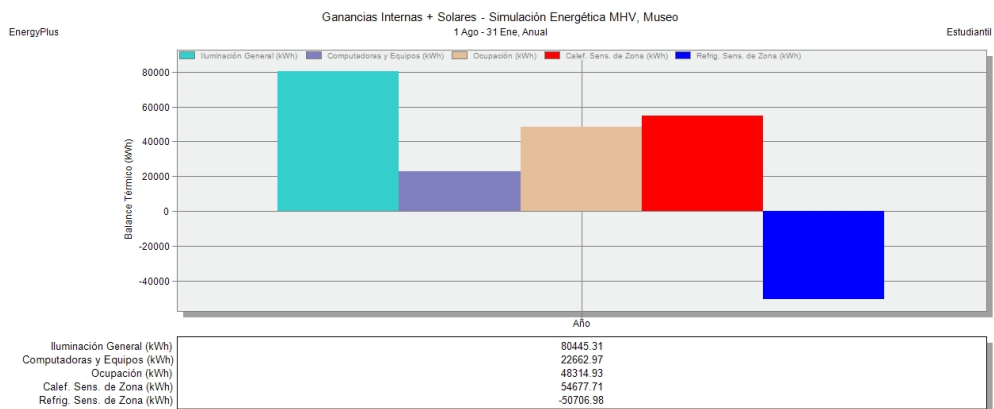


Figura 78. Ganancias internas durante el período de estudio en el Museo de Historia de Valencia.

En la figura 79 resulta muy reveladora respecto a lo mencionado anteriormente acerca de la carga del sistema de calefacción. Las condiciones climatológicas de la ciudad de Valencia propician que dicha demanda de

calefacción no sea demasiado elevada, respecto a la demanda de refrigeración. De hecho, la diferencia entre una demanda y otra es de un 35%, lo cual es un dato muy significativo.

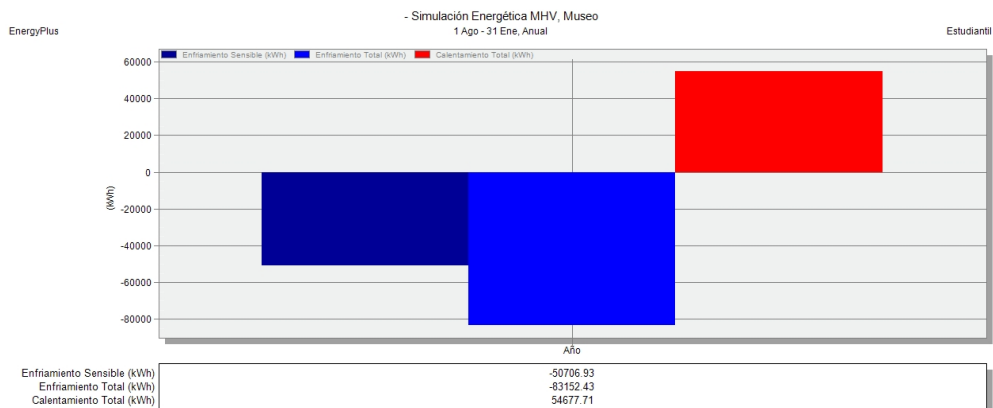


Figura 79. Demandas energéticas durante el período de estudio en el Museo de Historia de Valencia.

El consumo de combustible más destacado pertenece a la iluminación del museo con 80.445,31 kWh, seguido por la calefacción con 65.876,76 kWh y la refrigeración con 49.791,88 kWh (figura 80). Respecto al consumo de iluminación, resulta entendible debido a la usencia de aperturas que den acceso a iluminación natural. Por lo tanto, es necesario mantener las luminarias permanentemente en funcionamiento, a pesar de que el sistema está programado para mantener un nivel de iluminación relativamente bajo.

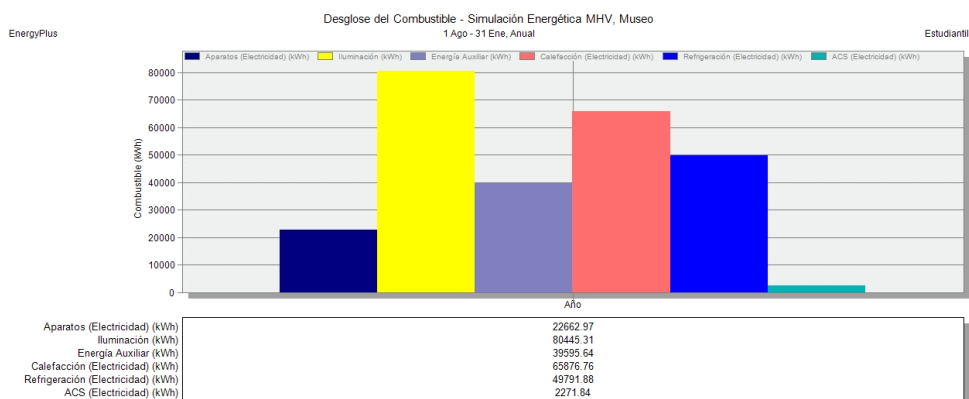


Figura 80. Desglose del combustible utilizado durante el período de estudio en el Museo de Historia de Valencia.

Siguiendo la misma disposición que la monitorización interior, se han simulado también las semanas y días más desfavorables, obteniendo temperaturas, humedades, el coeficiente del confort de Fanger y el número de horas de disconfort.

La figura 81 muestra la simulación de la semana más cálida (13-19 de agosto de 2015), y como las temperaturas internas rozan los 30°C. Asimismo, las humedades alcanzan prácticamente a diario valores demasiado elevados y fuera de los parámetros establecidos para la conservación de la muestra y el confort de los visitantes.

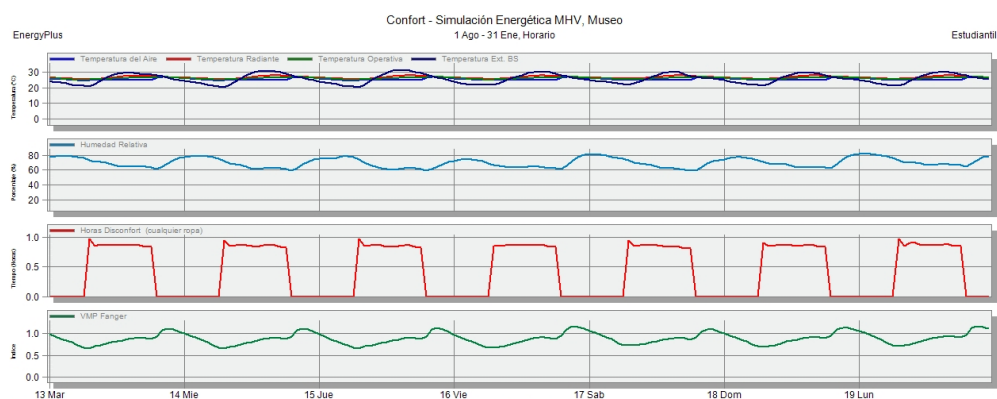


Figura 81. Temperatura del aire y humedad interiores, y temperatura exterior durante la semana más calurosa del período de estudio en el Museo de Historia de Valencia (13-19 de agosto del 2015).

Por su parte, durante la semana más fría que corresponde a la semana del 18 al 25 de enero de 2016 (figura 82), tanto las temperaturas como la humedad, se mantienen en valores aceptables. Esto se traduce en 0 horas de disconfort y valores del PMV muy cercanos a 0. Por lo tanto, el nivel de confort térmico en el interior del museo es mucho mayor en invierno que en verano.

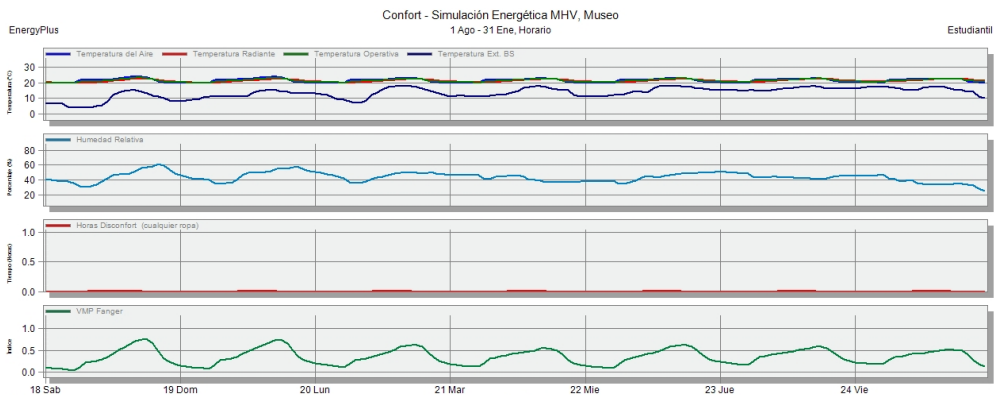


Figura 82. Temperatura del aire y humedad interiores, y temperatura exterior durante la semana más fría del período de estudio en el Museo de Historia de Valencia (18-24 de enero de 2016).

Además de haber simulado las semanas más desfavorables, también se ha considerado estudiar los días con las temperaturas más extremas. Esto ha servido para observar el comportamiento del edificio en situaciones límite, y los niveles de confort que éste es capaz de mantener.

La figura 83 muestra los cálculos del día 14 de agosto de 2015 en el cual las temperaturas han resultado ser las más altas durante el período de estudio. Se comprueba que los valores de disconfort se mantienen prácticamente durante todo el tiempo que el museo está abierto al público, manteniendo temperaturas entorno a los 27°C y la humedad en el 60%.

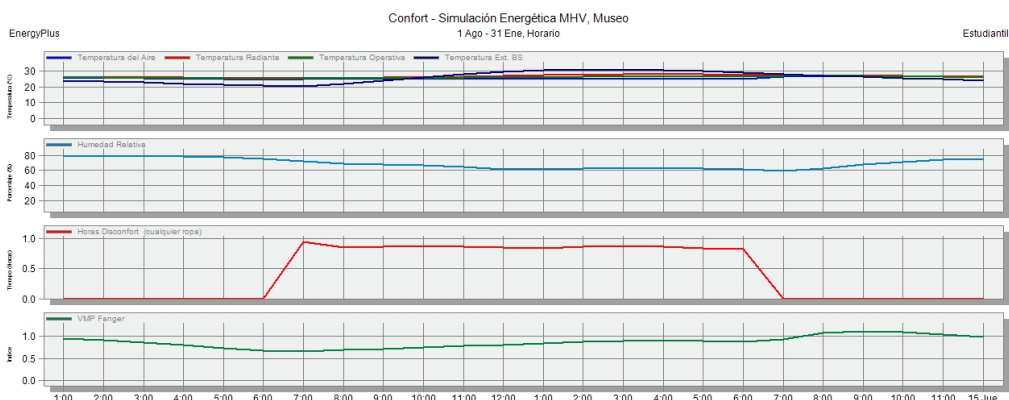


Figura 83. Temperatura del aire y humedad interiores, y temperatura exterior durante el día más cálido del período de estudio en el Museo de Historia de Valencia (14 de agosto de 2015).

Por su parte, durante le día más frío (24 de noviembre de 2015) y tal y como muestra la figura 84, los niveles de confort térmico interior son los adecuados durante la mayor parte del tiempo de funcionamiento del museo. Se alcanzan temperaturas interiores cercanas a los 24°C con humedades superando el 60%.

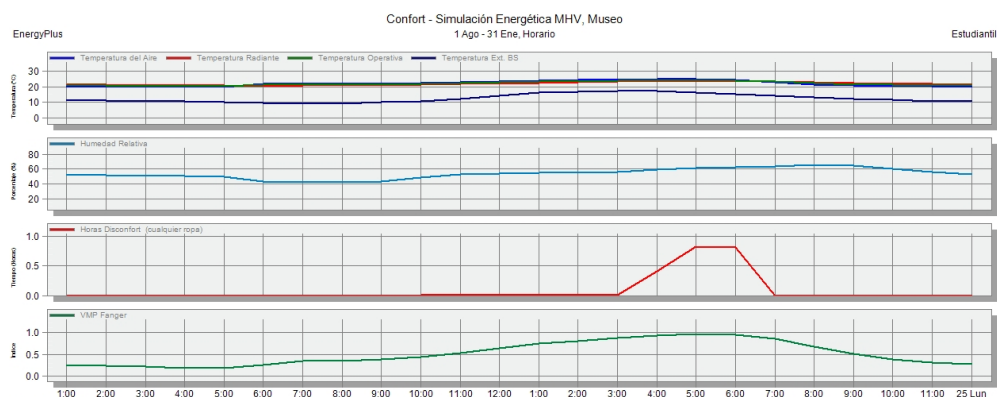


Figura 84. Temperatura del aire y humedad interiores, y temperatura exterior durante el día más frío del período de estudio en el Museo de Historia de Valencia (24 de noviembre de 2015).

Una vez analizados los datos extraídos de la simulación energética del Museo de Historia de Valencia, se ha podido llegar a las siguientes conclusiones parciales:

- Las mayores ganancias térmicas son las solares debido a la climatología de la ciudad de Valencia y a la gran superficie de la cubierta. Esto favorece a la demanda de calefacción.
- Por su parte, la demanda de refrigeración es un 35% más elevada que la de calefacción.
- Las horas de disconfort se centran en las estaciones cálidas, especialmente debido a las altas humedades entorno al 80%.
- Durante el invierno, tanto el confort térmico como las condiciones ambientales para la conservación de las piezas, son las adecuadas excepto algún momento puntual.

4.1.4. Optimización / Rehabilitación Energética

Se han valorado los resultados de las monitorizaciones interior y climatológica, del estudio estadístico del confort térmico y de las simulaciones energéticas, todo ello para tener una visión, detallada y de conjunto, de cuales son los puntos débiles del edificio y su gestión. Con todo ello, se ha analizado el comportamiento que tendría el edificio con los cambios propuestos. Obviamente, estas modificaciones se han optimizado para poder elegir la mejor opción en cada uno de los casos. Huelga mencionar que todas estas propuestas de mejora no comprometen en lo más mínimo el valor histórico y cultural del Museo de Historia de Valencia.

Se ha comenzado con la zona del edificio con mayor potencial de mejora debido a su superficie y a las condiciones climáticas. Se trata de la cubierta plana la cual recibe una gran cantidad de radiación solar, lo que hace que la demanda de refrigeración se eleve. Esta cubierta plana ya dispone de una capa de aislamiento de 10 cm que consiste en un rollo de fibra de vidrio con una transmitancia de $0,04 \text{ W/m}^2\text{k}$, el cual se ha propuesto sustituirlo por Poliestireno Expandido EPS con transmitancia de $0,029 \text{ W/m}^2\text{k}$. El espesor de esta nueva capa de aislamiento se ha llevado a estudio para optimizar su rendimiento (Tabla 18).

Tabla 18. . Valores de transmitancia de los diferentes espesores de aislamiento propuestos para instalar en la cubierta del Museo de Historia de Valencia.

Espesor	Transmitancia (U)
10 cm	$0,261 \text{ W/m}^2\text{k}$
15 cm	$0,180 \text{ W/m}^2\text{k}$
20 cm	$0,137 \text{ W/m}^2\text{k}$
25 cm	$0,111 \text{ W/m}^2\text{k}$

En la figura 85 se puede observar el comportamiento de la cubierta con los diferentes espesores, comparándolos con el del estado actual. Para lograr un mayor entendimiento de cómo funciona el edificio, se muestran tanto las demandas de calefacción y refrigeración, como las horas de disconfort y el consumo energético principal.

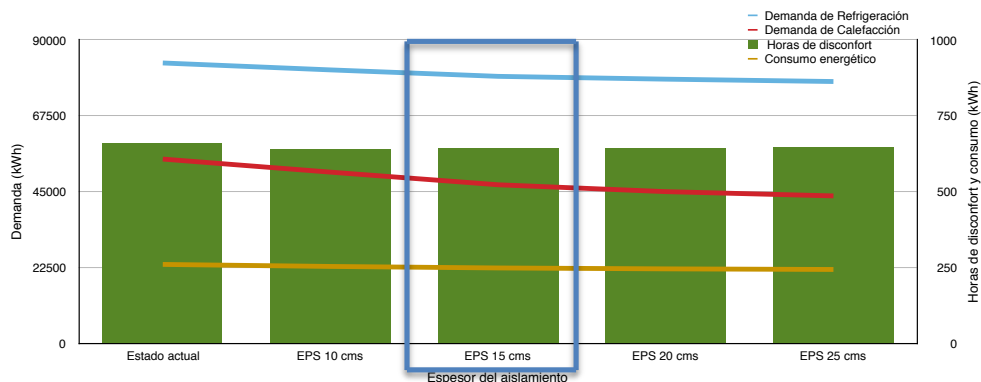


Figura 85. Comparativa de la demanda energética, horas de disconfort y consumo energético del Museo de Historia de Valencia durante el período de estudio con las diferentes propuestas de espesores a instalar en la cubierta.

Se ha optado por instalar un espesor de aislamiento de 15 cm, lo cual reduciría un 5% la demanda de refrigeración, un 14% la demanda de calefacción, 3% las horas de disconfort y un 5% el consumo total.

Seguidamente, se ha optado por dotar a las puertas secundarias de 10 cm de aislamiento de poliestireno expandido EPS (tabla 19). Estas puertas tienen un hueco intermedio de esta medida entre las dos placas de metálicas que las componen, por lo que resulta perfecto para mejorar el comportamiento de las mismas. La reducción del coeficiente U de transmitancia es de 3,124 W/m²k a 1,942 W/m²k, lo cual es más que considerable.

Tabla 19. Valor de transmitancia de la puerta propuesta para instalar en el Museo de Historia de Valencia.

Espeor	Transmitancia (U)
Poliestireno Expandido EPS 10 cm	1,942 W/m ² k

En la figura 86 se puede observar la comparativa de los resultados de la simulación del paso 1 (anterior) con los datos de la simulación del edificio con la modificación de las puertas.

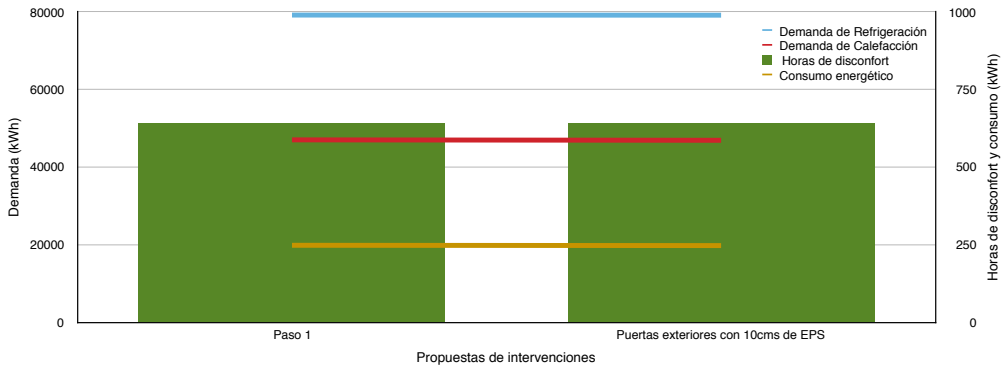


Figura 86. Comparativa de la demanda energética, horas de disconfort y consumo energético del Museo de Historia de Valencia durante el período de estudio con la propuesta 1 (aislamiento cubierta) y la propuesta 2 (puertas).

Los resultados indican que no resulta conveniente abordar este cambio debido al insignificante nivel de la mejora del comportamiento energético del edificio. Los cuatro aspectos a considerar experimentan mejoras cercanas al 1%, debido a lo cual se considera insuficiente.

Por último, la modificación final que se ha propuesto ha sido la adición de una capa de aislamiento en la cámara de aire que los muros exteriores tienen (exceptuando el muro norte o fachada principal). Una vez más, el espesor de esta nueva capa se ha decidido mediante simulaciones sucesivas del comportamiento del edificio con cada una de las opciones. En la tabla 20 se muestran los valores de transmitancia de los muros con las diferentes opciones.

Tabla 20. Valores de transmitancia de la cubierta según los diferentes espesores de poliestireno expandido propuestos para instalar en el Museo de Historia de Valencia.

Espesor	Transmitancia (U)
Poliestireno expandido 5 cm	0,292 W/m ² k
Poliestireno expandido 10 cm	0,194 W/m ² k
Poliestireno expandido 15 cm	0,145 W/m ² k
Poliestireno expandido 20 cm	0,111 W/m ² k

Los cálculos demuestran una mejora desde el paso 2 a la opción de 5 cm de espesor, de un 2% en la demanda de refrigeración, de un 8% en la demanda de calefacción, un 1% en las horas de disconfort y un 3% en el consumo total (figura 87). Estos resultados se dan como aceptables para realizar la modificación, aunque no hayan reducido notablemente demandas, consumo ni disconfort.

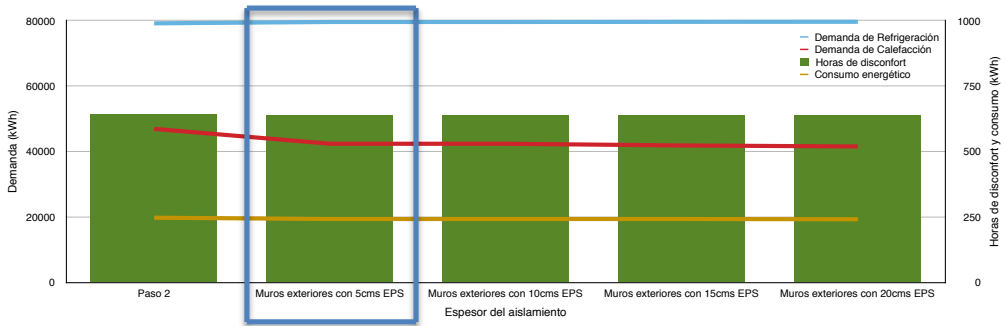


Figura 87. Comparativa de la demanda energética, horas de disconfort y consumo energético del Museo de Historia de Valencia durante el período de estudio con las diferentes propuestas de los espesores de aislamiento de EPS poliestireno expandido para los muros exteriores.

Para finalizar con las propuestas, se ha comparado el comportamiento original del edificio con la propuesta final con las modificaciones planteadas. Los resultados muestran una reducción de un 5% y un 20% en la demanda de refrigeración y calefacción, respectivamente. Por su parte, se ha reducido un 3% las horas de disconfort y un 7% el consumo total del edificio (figura 88).

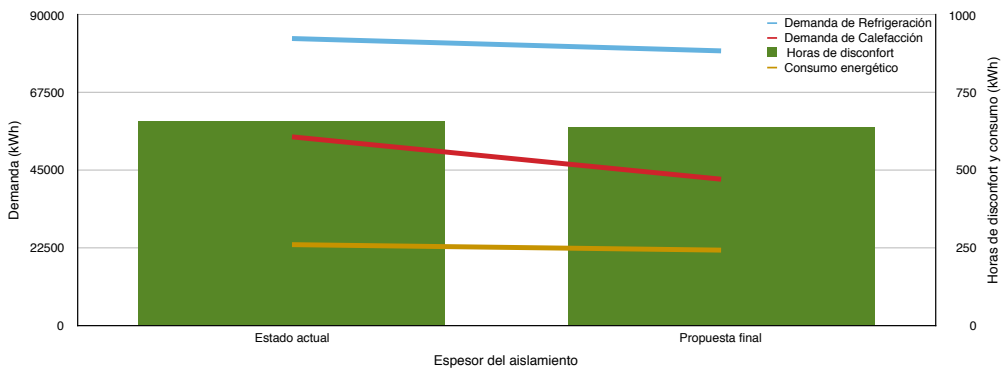


Figura 88. Comparativa de la demanda energética, horas de disconfort y consumo energético del Museo de Historia de Valencia durante el período de estudio entre el estado actual y la propuesta final.

Estas modificaciones no han resultado tan eficientes como podría imaginarse, sin embargo, el comportamiento del edificio se ve ligeramente mejorado. Por otro lado, es necesario puntualizar que todas las modificaciones planteadas son respetuosas con el valor patrimonial del edificio. Por ejemplo, la

adición de aislamiento en la cubierta puede realizarse por el exterior del edificio donde se encuentra la zona verde y la pista deportiva. Por su parte, la mejora en los muros exteriores se realiza a través de rellenar la cámara de aire ya existente y que además es perfectamente accesible.

4.2. C.E.I.P. Fabián y Fuero

4.2.1. Monitorización Meteorológica e Interior

Al igual que en el Museo de Historia de Valencia, se ha realizado una minuciosa monitorización tanto meteorológica como de las condiciones interiores del edificio del C.E.I.P. Fabián y Fuero.

Respecto a las condiciones medioambientales en la población de Villar de Arzobispo durante el período de estudio, la figura 89 muestra temperaturas entre 15°C y 20°C durante los meses de octubre y noviembre, teniendo algunos días temperaturas rozando los 25°C. Sin embargo, en el mes de diciembre las temperaturas registradas descienden llegando a mantenerse entorno a los 10°C durante todo el mes. Por otro lado, la humedad relativa de los dos primeros meses muestra variaciones entre el 60% y el 90%, aumentando este rango al 40% y el 90% durante el mes de diciembre.

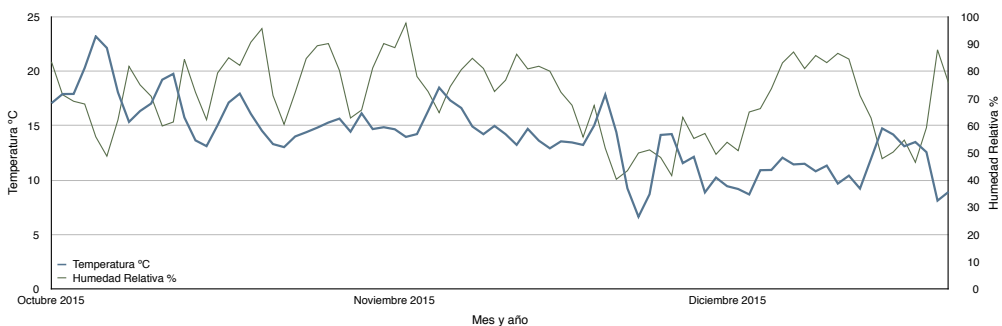


Figura 89. Temperatura del aire y humedad medias en la población de Villar del Arzobispo durante el período de estudio.

Por su parte la radiación solar medida alcanza unos valores aproximados de 500W/m² de media durante todo el estudio, teniendo picos mínimos y máximos

cercanos a 200W/m^2 y 800W/m^2 , respectivamente. En cuanto a las precipitaciones, son todavía inferiores a las de la ciudad de Valencia, considerándose prácticamente inexistentes (Figura 90).

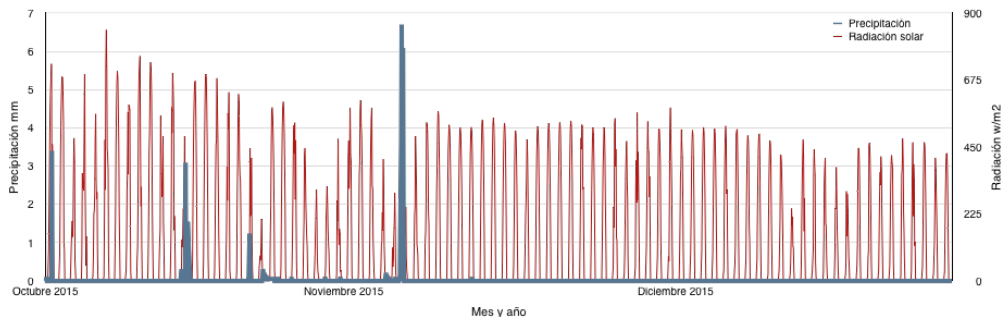


Figura 90. Precipitación y radiación solar en la población de Villar del Arzobispo durante el período de estudio.

Respecto al análisis interior, como se ha comentado anteriormente, se han instalado cuatro sondas de temperatura y humedad en el edificio con el fin de monitorizar las condiciones interiores del mismo. En la figura 91, se muestran los valores medios horarios recogidos durante el período de estudio para cada dispositivo. Se ha podido observar un mismo patrón en la variación de las temperaturas que debido al horario de funcionamiento de la calefacción. Según la dirección del centro, no existe una temperatura de consigna a la que referenciarse durante el funcionamiento normal de la escuela. Los propios maestros regulan esa temperatura abriendo y cerrando las llaves de paso de los radiadores instalados en cada clase, incluso abriendo ventanas. Las sondas siguen una tendencia marcada por el funcionamiento de la calefacción, aunque muestran diferencias considerables. La sonda 1 situada en la planta baja en aula más al sur del edificio, muestra las temperaturas más bajas, prácticamente sin llegar a alcanzar los 20°C durante el horario lectivo. En la figura 91 se puede observar claramente como la temperatura interior se ve influenciada de manera drástica por el funcionamiento de la calefacción, incrementándose a las 07:00 horas y decreciendo a las 17:00 horas. Mientras la calefacción permanece apagada la temperatura cae lentamente sin llegar a alcanzar los 17°C , esto es debido sin duda a la gran inercia térmica del edificio.

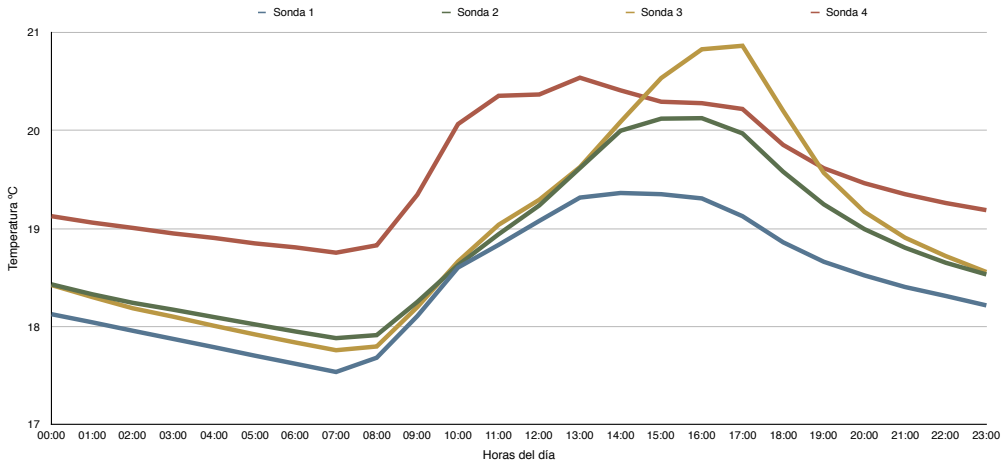


Figura 91. Variación de las temperaturas medias de las doce sondas instaladas en el C.E.I.P. durante el período de estudio.

Respecto a la humedad relativa en el interior del centro, en la figura 92 se pueden observar las humedades medias en intervalos horarios durante los meses monitorizados. Se aprecia una gran estabilidad en la humedad interior del edificio, principalmente con parámetros alrededor del 55%. Sin embargo, al igual que ocurre con los valores medios de temperatura, la sonda 1 (situada en la planta baja) se mantiene en valores diferentes al del resto de sondas (situadas en la planta primera). Este dispositivo muestra lecturas entorno al 65%, lo que supone una diferencia media del 15% en relación a las otras tres sondas.

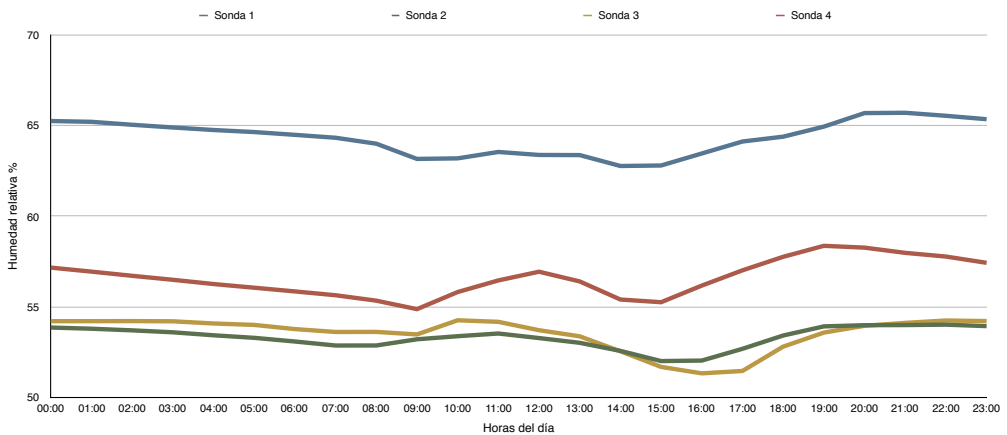


Figura 92. Variación de las humedades relativas medias de las doce sondas instaladas en el C.E.I.P. durante el período de estudio.

Las temperaturas del aire interior registradas por las cuatro sondas instaladas en el centro durante el período se muestran en la figura 93. Estos datos revelan los datos horarios recogidos durante toda la monitorización, mostrando valores que alcanzan los 24°C como temperatura máxima y superando por muy poco 14°C como mínima.

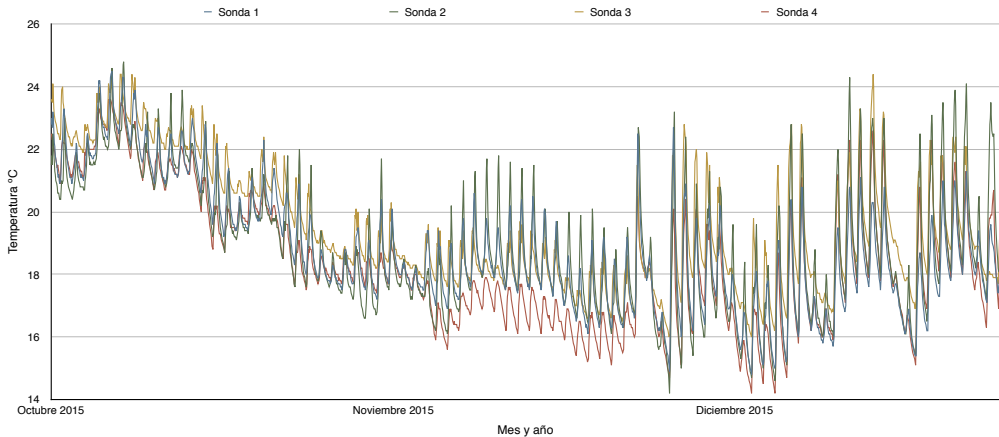


Figura 93. Temperatura del aire interior de las doce sondas instaladas en el C.E.I.P. durante el período de estudio.

En lo que se refiere a la humedad relativa en el interior del edificio, en la figura 94 se puede observar una gran estabilidad entre valores de entre aproximadamente 40% y 70%. Sin embargo durante el mes de noviembre en la planta baja se registraron valores un tanto más elevados alcanzando el 90%.

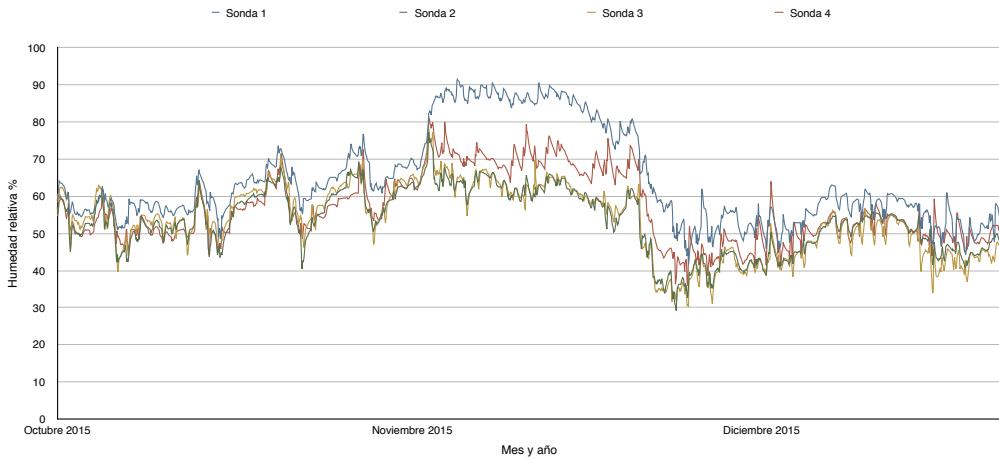


Figura 94. Humedad relativa interior de las doce sondas instaladas en el C.E.I.P. durante el período de estudio.

Se ha analizado también el comportamiento del edificio durante las semanas y los días más desfavorables, tanto por bajas como por altas temperaturas. Se ha considerado como la semana más fría la del 7 al 13 de diciembre de 2015, y como la más cálida del 1 al 7 de octubre de 2015. Respecto a los días con las temperaturas más extremas se han seleccionado el 5 de octubre de 2015 con las temperaturas más altas y el día 23 de noviembre con las temperaturas más bajas.

Durante la semana más fría (7-13 de diciembre de 2015) se alcanzaron temperaturas de 4°C de mínima y como temperaturas máximas apenas superaban los 15°C en el centro del día (Fig. 95). Se puede apreciar también durante los días 12 y 13 de diciembre (sábado y domingo), en los cuales la calefacción no funcionó, la poca influencia de la temperatura exterior en la temperatura interior. Sin embargo, la gran inercia térmica causa que el descenso de la temperatura interior durante estos dos días sea muy leve y uniforme. Además cabría comentar la gran homogeneidad de temperaturas registrada en los cuatro dispositivos durante esta semana con las temperaturas más bajas.

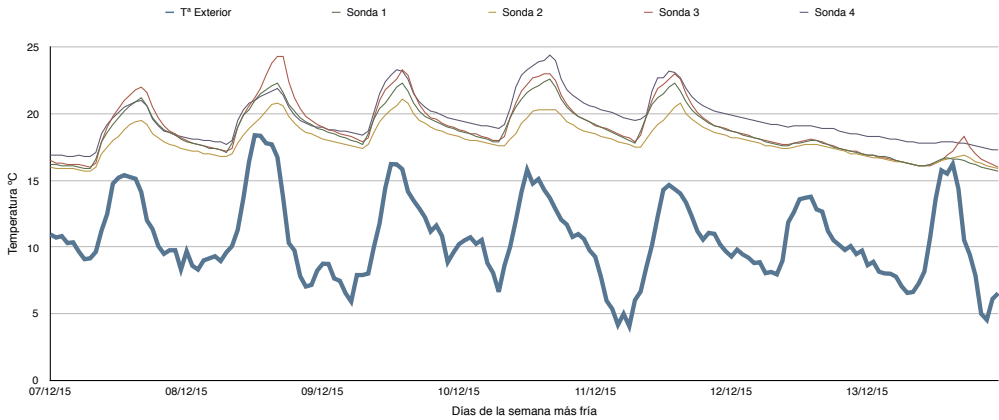


Figura 95. Temperaturas interiores y exterior de la semana más fría durante el período de estudio.

Por su parte, durante la semana más calurosa (figura 96), los valores máximos superan con claridad los 25°C. A diferencia de la semana más fría (figura 95), las temperaturas son mucho más uniformes por la ausencia de climatización, y esto propicia que la influencia de las temperaturas exteriores se observe claramente.

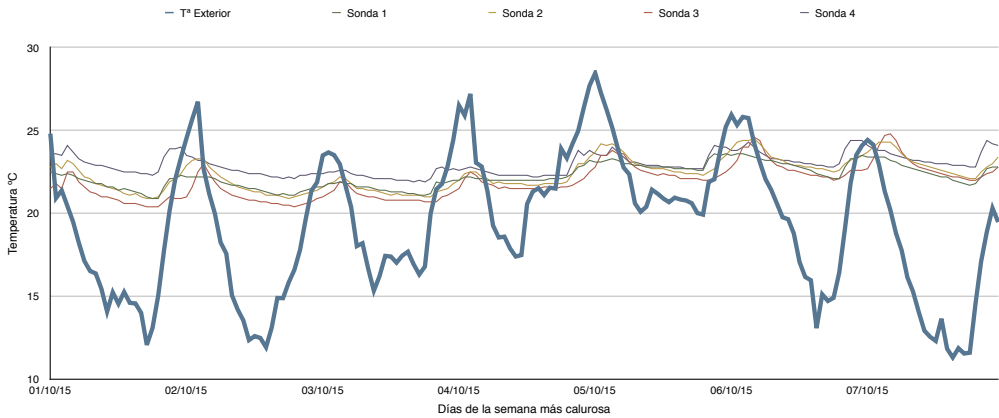


Figura 96. Temperaturas interiores y exterior de la semana más calurosa durante el período de estudio.

Ya para finalizar, se han estudiado los días con las condiciones más desfavorables, siendo estos el 5 de octubre y el 23 de noviembre de 2015, los días más cálidos y fríos, respectivamente. En la figura 97 se puede observar la gran igualdad en las temperaturas de los diferentes lugares del centro. En los momentos en los cuales el edificio está deshabitado las temperaturas se

mantiene en torno a 22°C, sin embargo en cuanto las actividades comienzan la temperatura comienza a elevarse por las ganancias internas de ocupación, iluminación y equipos. Todo ello se respalda en la coincidencia del incremento de temperaturas en torno a las 08:00 horas cuando los alumnos entran al centro y el descenso de las mismas sobre las 17:00 cuando terminan las clases. Respecto a los valores máximos y mínimos, se mantienen en los niveles aceptables de confort térmico de 22°C-24°C. Además, las condiciones exteriores no afectan en demasía a las temperaturas interiores como se deduce de la homogeneidad de la temperatura interior con diferencias menores de 1°C respecto al salto térmico exterior de 11°C.

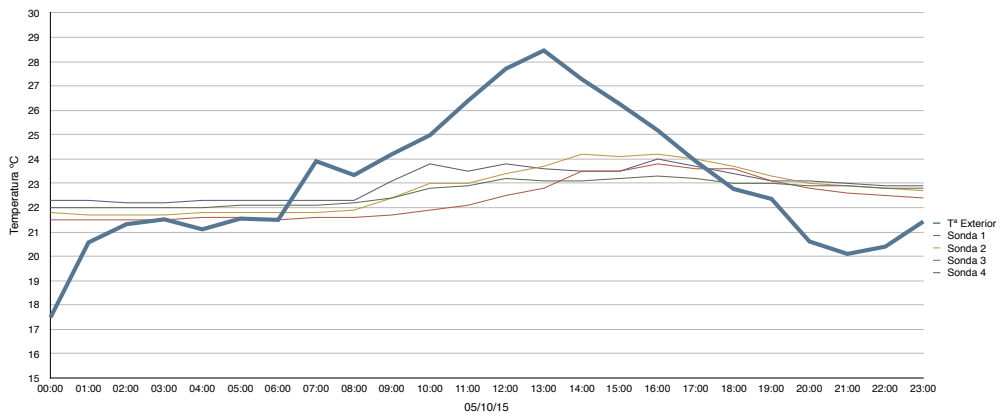


Figura 97. Temperaturas interiores y exterior del día más caluroso en el MHV durante el período de estudio.

El análisis de las temperaturas del día más frío de la monitorización muestra unos valores mucho menos homogéneos a lo largo del día, especialmente entre el día y la noche. Las ganancias interiores y sobre todo la activación de la calefacción marca el comportamiento del ambiente interior, con diferencias de 9°C entre máxima y mínima. Esto hace que la calefacción del edificio no consiga alcanzar temperaturas de confort en la mayor parte del edificio hasta las 11:00 horas. Las condiciones interiores se ven influenciadas en su totalidad por el funcionamiento de la calefacción y experimentando un crecimiento de temperaturas a las 08:00 horas y un descenso a las 17:00 horas (figura 98).

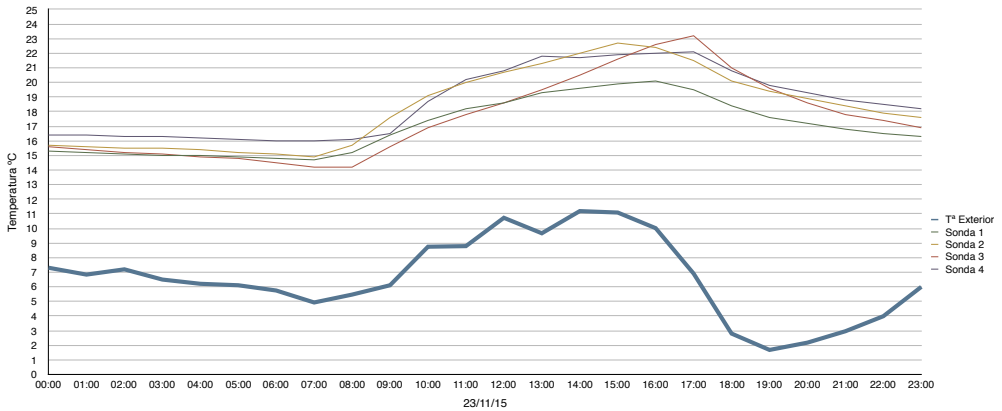


Figura 98. Temperaturas interiores y exterior del día más caluroso en el C.E.I.P. durante el período de estudio.

Analizando conjuntamente la recogida de datos meteorológicos y la monitorización interior del edificio, se pueden extraer las siguientes conclusiones parciales:

- Los datos meteorológicos han resultado seguir de nuevo las características de la clasificación climática de Köppen de clima suave y húmedo (Csb-Oceánico-mediterráneo).
- La calefacción marca el comportamiento de la temperatura interior en invierno, ya que esta no se mantiene en funcionamiento las 24 horas del día, sino que tan sólo durante el horario lectivo. Por lo tanto, el invierno existe una notable diferencia entre temperaturas máximas y mínimas. Sin embargo, en verano al no disponer el edificio de instalación de aire acondicionado, las temperaturas se muestran más constantes.
- La gran inercia del edificio ayuda a que durante el invierno las temperaturas no caigan bruscamente durante las horas de no funcionamiento de la calefacción.
- La planta baja muestra valores de humedad considerablemente más altos y temperaturas levemente más bajas que la planta superior.

4.2.2. Estudio Estadístico

El caso del estudio estadístico en el edificio del C.E.I.P Fabián y Fuero, es diferente al del MHV al no haber visitantes y sí el mismo personal y alumnado diariamente. Las respuestas recogidas del equipo de maestros y de los alumnos de primero de primaria alcanzan las 408 y 188, respectivamente, durante el período de estudio (Octubre-Diciembre 2015). Se ha aceptado como válido el número de cuestionarios obtenidos, ya que el tamaño de muestra coincide con la población ($n=N$), por lo que se ha encuestado a todos los individuos. Obviamente, y como se ha explicado en el punto 3.3.2., se han dejado fuera del estudio los alumnos menores de 6 años, ya que siguiendo la opinión de los maestros, no sabrían interpretar ni dar respuestas fiables a las encuestas. Por otro lado, y con el objetivo de validar la muestra obtenida, se ha calculado el porcentaje de respuestas respecto a los días lectivos del centro. Durante el período de monitorización y estudio (1 de octubre – 21 de Diciembre) hubieron 55 días lectivos, descontando fines de semana y festivos. Asimismo, se encuestaron a 10 maestros y 48 alumnos de primero de primaria, recopilando 408 y 188 encuestas, respectivamente. Por lo tanto, el ratio de respuestas de los maestros en el período de estudio fue de 74,18% y el de los alumnos, no se ha podido alcanzar un porcentaje mayor del 8% ya que los tutores consideraron no realizar las encuestas con mayor frecuencia. Analizados los datos anteriormente mencionados, se han dado por buenos los tamaños de las muestras en ambos casos.

Como se ha comentado anteriormente, los maestros encuestados han sido diez, nueve mujeres y un hombre. El rango de edades es variado aunque centrado de 51 a 60 años (50%), 41 a 50 años (30%), y 31 a 40 años y 18 a 30 años con 10% respectivamente (figura 99).

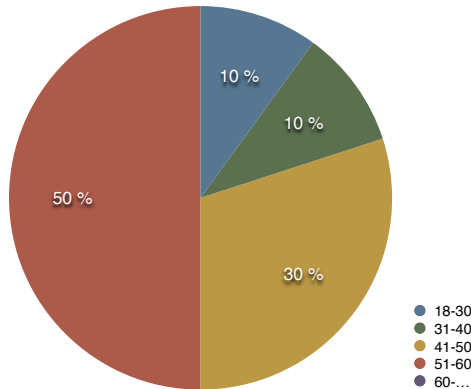


Figura 99. Porcentaje de los maestros del CEIP por rango de edades.

Los dos modos de transportes preferidos por los maestros del centro han sido caminando con 214 respuestas y transporte motorizado (automóvil) 167 respuestas (figura 100). En segundo plano y como opciones muy alejadas han sido seleccionadas corriendo (12) y en bicicleta (3).

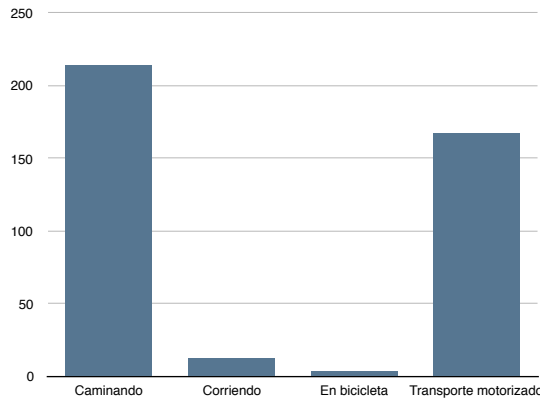


Figura 100. Cantidad de veces que los maestros encuestados accedían al centro según el modo de transporte durante el período de estudio.

Respecto a la opinión de los encuestados acerca del ambiente exterior, se puede afirmar de nuevo que la clasificación climatológica de Köppen vuelve a ratificarse. Tanto la opción de “Neutral” (33% con 132 respuestas) como la de “fresco” (42% con 167 respuestas) dominan este apartado, demostrando las suaves temperaturas del lugar. Ya con un 10% de los maestros encuestados aparecen los valores de “templado” y “frío”, con 38 y 40 respuestas,

respectivamente. Por último y como resultados marginales se han obtenido porcentajes del 3% (11 respuestas) para “calor”, 2% (7 respuestas) para “mucho frío” y 1% (2 respuestas) para “mucho calor” (figura 101).

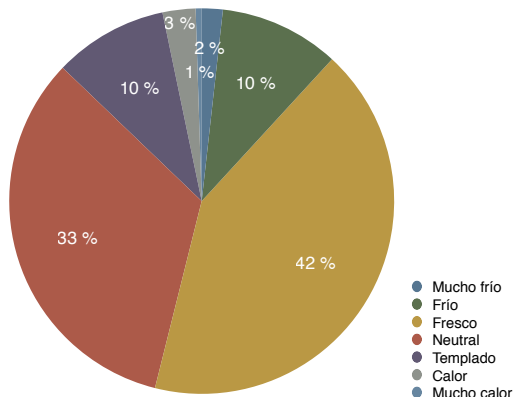


Figura 101. Porcentaje de los maestros del CEIP durante el período de estudio según su percepción del clima exterior.

Por su parte la figura 102 muestra las opiniones de los encuestados sobre la temperatura interior del centro. Los resultados han vuelto a ser bastante moderados respondiendo “Neutral” un 45% de los maestros con 178 opiniones, un 24% para “templado” con 94 respuestas y con 70 opiniones “fresco” que supone un 18%.

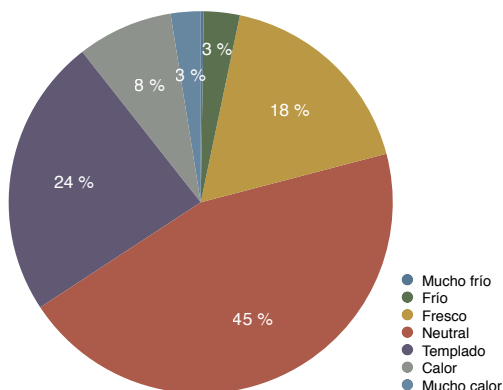


Figura 102. Porcentaje de los maestros del CEIP durante el período de estudio según su percepción de la temperatura interior del edificio.

Toda la plantilla docente lleva trabajando en el edificio varios años y conocen perfectamente su comportamiento térmico. Esto ha ayudado a responder a la pregunta de la expectativa de la temperatura interior del centro antes de acceder al mismo como muestra la figura 103. El 70% de los encuestados ha respondido que lo esperaba tal cual estaba contando con 276 respuestas en este sentido. En cambio, las 81 respuestas respaldando la opción de “más frío” corresponden al 20%. Por su parte, el 10% de los maestros contestaron que esperaban el edificio con la temperatura más alta marcando la casilla de “más calor” 40 veces.

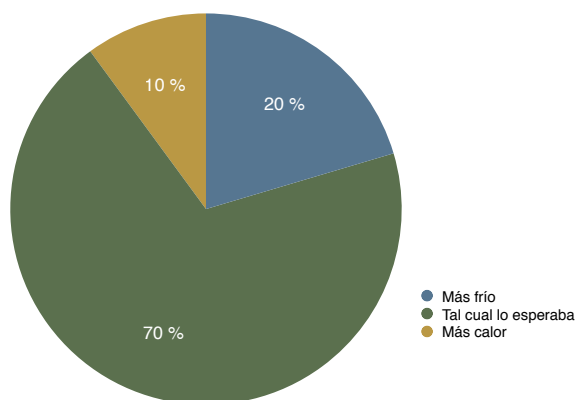


Figura 103. Porcentaje de los maestros del CEIP durante el período de estudio según su expectativa de la temperatura interior del edificio.

Las opiniones sobre las condiciones ambientales interiores del centro también fueron registradas mediante los cuestionarios (figura 104). El 57% de los encuestados ha considerado la humedad interior como “neutral” con 225 respuestas. “Muy húmedo” o “húmedo” fueron las opciones del 1% y el 14%, respectivamente. Por el contrario, en 112 ocasiones los maestros opinaron que el ambiente interior era “seco” suponiendo el 28% de los votos.

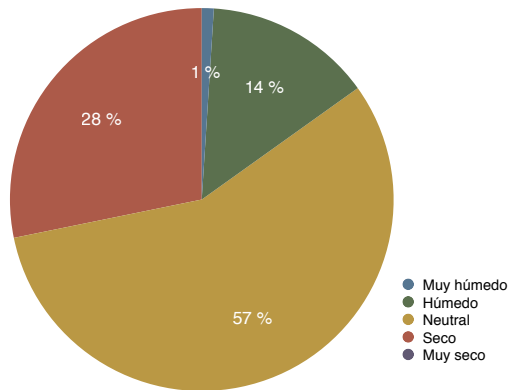


Figura 104. Porcentaje de los maestros del CEIP durante el período de estudio según su opinión sobre la humedad en el interior del edificio.

Por su parte, la calidad del aire interior fue tabulada como “buena” o “muy buena” en el 32% de las opiniones con 125 respuestas positivas. Al contrario, las opiniones negativas como “muy malo” o “malo” resultaron el 8% con 29 respuestas. Por último, la opción de “neutral” ha sido la más común entre los encuestados marcando esta casilla en 243 suponiendo un 57% (figura 105).

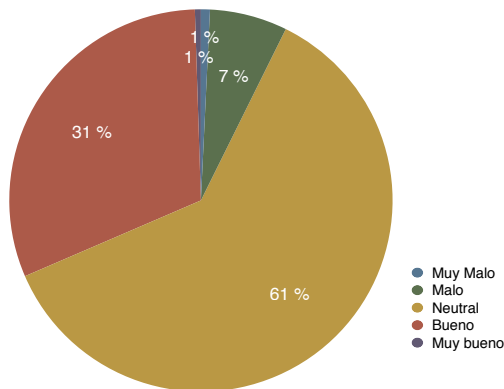


Figura 105. Porcentaje de los maestros del CEIP durante el período de estudio según su opinión sobre la calidad del aire interior del edificio.

Al igual que en el estudio estadístico del MHV, ha sido necesario preguntar a la población del centro si disponen de climatización en sus hogares, y si la han utilizado recientemente, para valorar el coeficiente de adaptabilidad de los

usuarios. En este caso, los diez maestros confirmaron que tenían instalación de calefacción y aire acondicionado en sus residencias (figura 106).

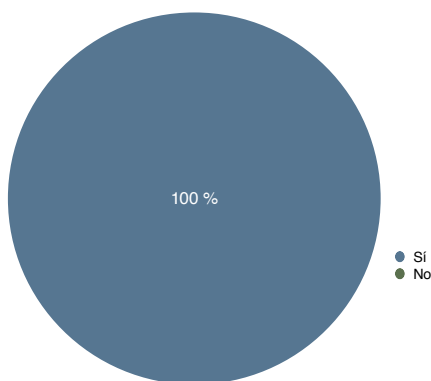


Figura 106. Porcentaje de los maestros del CEIP durante el período de estudio que disponen de aire acondicionado/calefacción en sus hogares.

Sin embargo, tal y como muestra la figura 107, los encuestados no suelen poner en funcionamiento estos sistemas debido a la suave climatología. Tan sólo en un 34% (136 respuestas) de las ocasiones el resultado fue positivo a la utilización de las instalaciones de climatización, por un 66% (261 veces) en las que no se activaron.

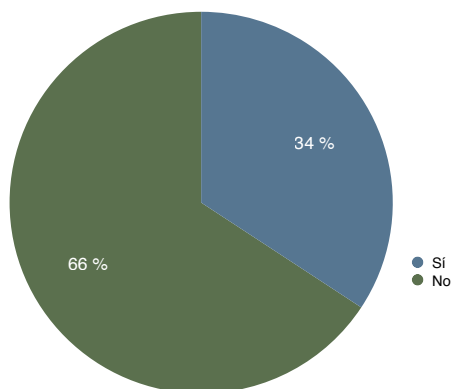


Figura 107. Porcentaje de los maestros del CEIP que respondieron afirmativamente a la posesión de aire acondicionado y/o calefacción durante el período de estudio, que utilizaron alguna de estas instalaciones en sus hogares recientemente.

Analizando todos los datos recogidos en los cuestionarios del personal docente, se han extraído las siguientes conclusiones parciales:

- Los encuestados han sido nueve mujeres y un hombre, estando el 5 maestros en el rango de edades entre 51 y 60 años, el 3 entre 41 y 50 años, y el resto todos más jóvenes. Las dos formas elegidas para acceder al centro educativo son caminando y en automóvil.
- La opinión de la temperatura exterior se ha centrado en valores suaves como “neutral” con un 33% y “fresco” con un 42%.
- Igualmente, las respuestas sobre la temperatura interior en el edificio son muy moderadas, un 87% marcaron las casillas de “neutral”, “templado” o “fresco”.
- Un 70% se esperaba las condiciones térmicas que se encontró en el centro, frente a un 20% que se lo esperaba más frío.
- Respecto a la humedad, al 57% de los maestros le pareció que el ambiente interior era “neutral”, frente al 28% que pensó que era “seco”.
- En general, la opinión sobre la calidad del aire es muy buena, con un 61% de respuestas de “neutral” y un 31% de “bueno”.
- Los diez docentes disponen de climatización en sus hogares, sin embargo tan sólo un 66% de respuestas fueron positivas acerca de la utilización de la misma en los días anteriores.

Como se ha comentado anteriormente, además de haber encuestado a los docentes del centro también se preguntó a los alumnos de primero de primaria (6-7 años) por su percepción sobre las condiciones ambientales del edificio. El resultado de este cuestionario ha revelado datos muy interesantes que a continuación se describen.

En la figura 108 se observa que la distribución de géneros está muy repartida con un 46% para el sexo femenino y un 54% para el masculino, con 102 respuestas de niños y 86 de niñas, respectivamente.

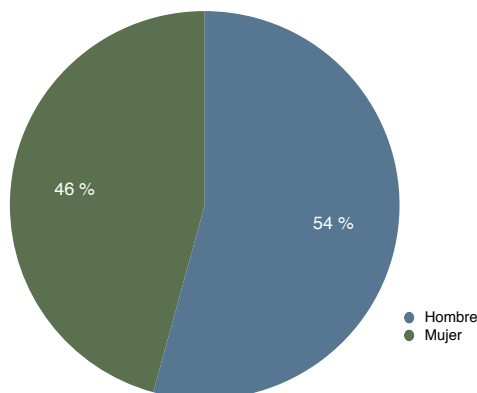


Figura 108. Porcentaje de mujeres y hombres de los alumnos de primero de primaria en el CEIP durante el período de estudio.

Ya respecto a la percepción de la temperatura en el interior del aula, la figura 109 muestra que el 32% de los alumnos se sienten perfectamente con la temperatura actual. Sin embargo existe un gran porcentaje de los niños que no se sienten totalmente cómodos, por ejemplo, las opciones de “templado”, “calor” y “mucho calor” suman un total de 71 respuestas representando un 38% de las encuestas. Por el contrario, las opiniones opuestas también alcanzan valores más que considerables con 56 casillas marcadas lo que resulta un 29%.

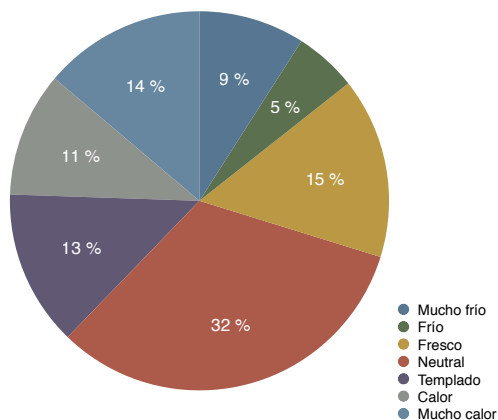


Figura 109. Porcentaje de los alumnos de primero de primaria del CEIP durante el período de estudio según su percepción de la temperatura interior del edificio.

Por otro lado, se les preguntó si desearían que la temperatura del aula fuera diferente (figura 110) y las respuestas fueron un 26% de “tal cual está” con 49 respuestas, un 28% para las opciones de “un poco mas frío”, “más frío” y “mucho más frío”. Sin embargo, las alternativas de temperaturas más altas representan un 38% con 75 respuestas en este sentido. Hay que destacar que el 26% de las respuestas apuntaban a que los alumnos preferían un ambiente mucho más caluroso.

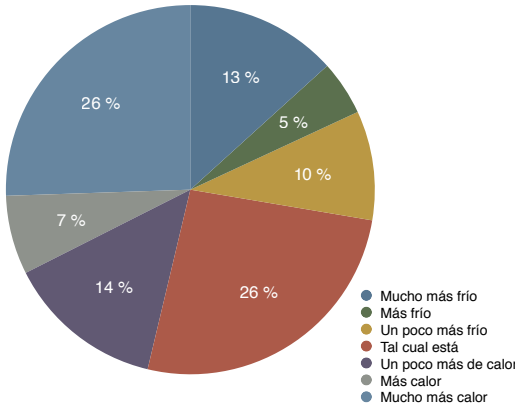


Figura 110. Porcentaje de los alumnos de primero de primaria del CEIP durante el período de estudio según su deseo sobre la temperatura interior del edificio.

Por su parte, los alumnos expresaron su sentimiento de confortabilidad general en una de las cuestiones resultando que un 91% (172) de las respuestas fueron afirmativas en contra de un 9% (16) negativas (figura 111).

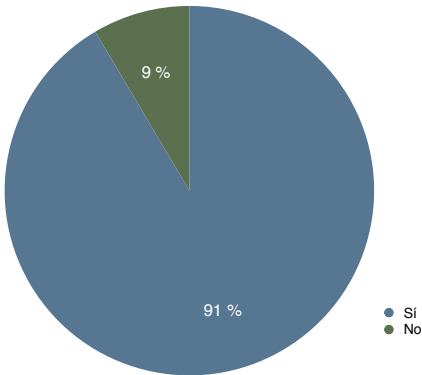


Figura 111. Porcentaje de los alumnos de primero de primaria del CEIP durante el período de estudio que se encuentran confortables con la temperatura interior del edificio.

Asimismo, en el aspecto de aislamiento térmico por la vestimenta, como se explica en el apartado 3.3.2. se ha intentado simplificar al máximo la pregunta para que las encuestas fueran suficientemente dinámicas, preguntando tan sólo si el alumno encuestado llevaba suéter o sudadera en el momento de responder (figura 112). El 84% de las respuestas fueron que “sí” llevaban esta prenda puesta, y obviamente, el 16% se respondieron en sentido contrario.

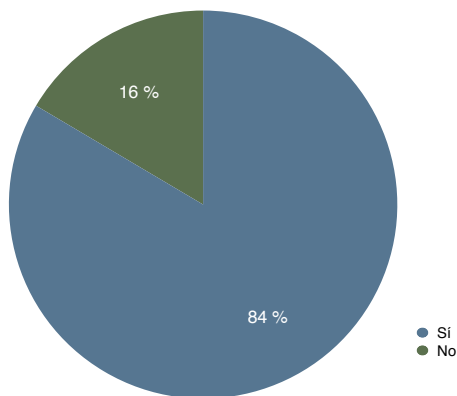


Figura 112. Porcentaje de los alumnos de primero de primaria del CEIP durante el período de estudio que llevan puesta jersey o sudadera

Ya por último, se consideró interesante saber el nivel de cansancio de los alumnos para poder compararlo con el resto de factores (figura 113). El 55% de los encuestados marcaron la casilla de “no estoy cansado/a”, el 30% declararon estar “un poco cansado/a” y un 15% contestó encontrarse “muy cansado/a”. Asimismo, se ha comprobado también la actividad metabólica antes de responder la encuesta (figura 114), resultando que en la mayoría de los casos los alumnos estaban comiendo sentados (91), descansando en el patio (37), lo que se traduce en una actividad metabólica baja. Un valor medio ha resultado de los alumnos que han estado realizando actividades en clase (9) y como alta actividad metabólica los que respondieron haber estado jugando/corriendo en el patio (46) y en clase educación física (5).

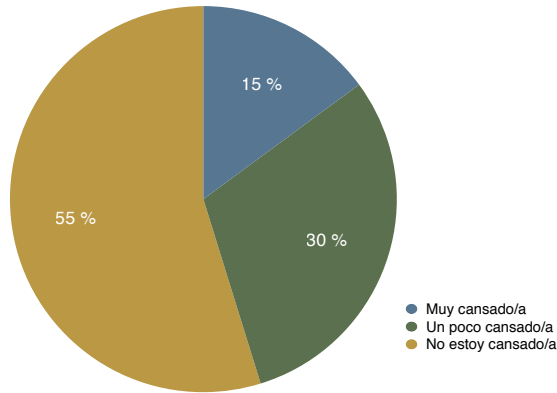


Figura 113. Porcentaje de los alumnos de primero de primaria del CEIP durante el período de estudio según su grado de cansancio.

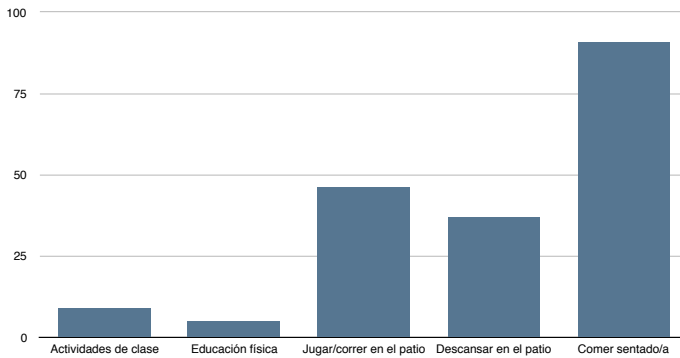


Figura 114. Cantidad de alumnos de primero de primaria del CEIP durante el período de estudio según la actividad que realizaron 30 minutos antes de rellenar el cuestionario

Una vez estudiadas también las respuestas a los cuestionarios de los alumnos de primero de primaria, se han extraído las siguientes conclusiones parciales:

- Los géneros de los alumnos están repartidos casi al 50%, 102 respuestas de alumnos por 86 de alumnas.
- Aproximadamente, 1/3 de las respuestas de los alumnos revelan que han sentido “frío”, 1/3 han sufrido “calor” y el último 1/3 han estado confortables con la temperatura.
- 1/4 de los alumnos no deseó ningún cambio en la temperatura interior del aula, 1/4 prefería bajar las temperatura, y casi la mitad de los encuestados

prefería que las temperaturas subieran, en un 26% deseaban que lo hicieran considerablemente.

- A pesar de todas las opiniones anteriores, una inmensa mayoría (91%) se encontraba “a gusto”, y un 84% llevaba puesto un suéter o una sudadera, en el momento de responder el cuestionario.
- Unos minutos antes de la realización de la encuesta, casi un 75% de los alumnos se encontraba con una actividad metabólica baja, y aproximadamente un 25% registró una actividad alta o muy alta. Estos resultados encajan con los niveles de cansancio expresado por los encuestados, un 15% se encontró “muy cansado”, un 30% contestó sentirse “un poco cansado” y un 55% respondió “no sentirse nada cansado”.

Por su parte, las impresiones del equipo de docente del colegio antes de comenzar el estudio resultaron reveladoras. Tanto en los meses de invierno como de verano, la sensación de calor es muy intensa. La ausencia de instalación de aire acondicionado para los días cálidos y el potente sistema de calefacción unido a la alta inercia térmica de edificio, pueden ser las razones de estas sensaciones de disconfort.

4.2.3. Simulación Energética

Igual que en el Museo de Historia de Valencia, se ha simulado el comportamiento energético del edificio que alberga el C.E.I.P. Fabián y Fuero en Villar del Arzobispo.

Se han obtenido resultados de confort térmico que se observan en la figura 115, mostrando valores de temperaturas interiores del aire, radiante, operativa y exterior. Analizando los datos de temperaturas interiores se puede diferenciar completamente dos períodos, cuando la calefacción está en funcionamiento y cuando no. Durante la primera parte del estudio, las temperaturas interiores han

sido influenciadas enormemente por las condiciones ambientales, en cambio, en la segunda parte cuando la calefacción entraba en funcionamiento, el ambiente interior ha dejado de depender de las temperaturas exteriores y ha pasado a hacerlo del funcionamiento de la calefacción. Sin embargo, tanto las temperaturas como la humedad se han mantenido en valores dentro de los deseados, exceptuando algunos momentos con picos fuera del rango que marca el INSHT [118].

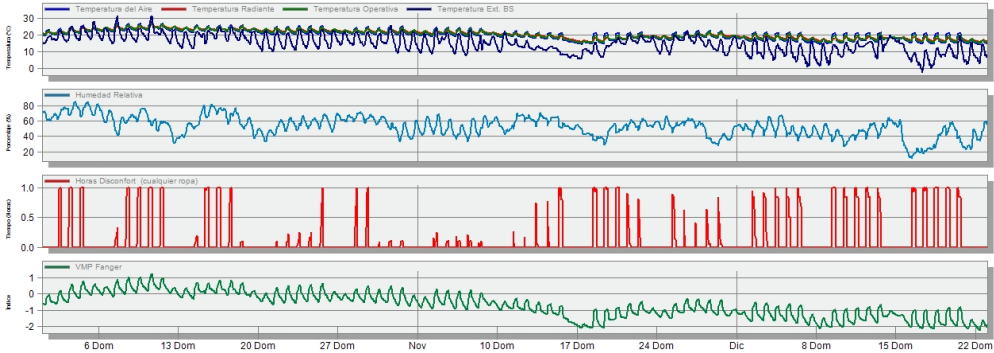


Figura 115. Temperaturas y humedades interiores, temperatura exterior, horas de disconfort y valor VMP Fanger por horas durante el período de estudio en el C.E.I.P. Fabián y Fueero.

Terminando con los cálculos de confort en las figura 116 se pueden observar los resultados para los valores del VMP de Fanger y las horas de disconfort según la ASHRAE 55 [10], alcanzando -0,69 y 240,28, respectivamente.

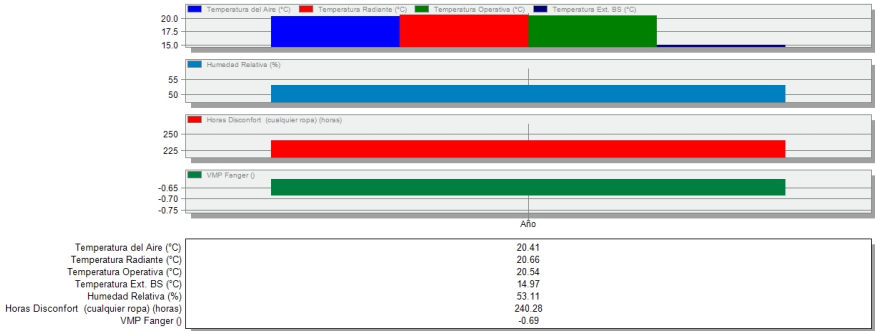


Figura 116. Temperaturas y humedades interiores, y valor VMP Fanger medios, y Horas de disconfort totales durante el período de estudio en el C.E.I.P. Fabián y Fueero.

Respecto a las ganancias solares e internas del edificio, las importantes son las primeras con 9.496,68 kWh como muestra la figura 117. La iluminación interior y la ocupación también tiene un valor importante dentro de las ganancias internas con 5.619,46 kWh y 3.927,05 kWh, respectivamente. Para finalizar, la calefacción muestra 2.409,11 kWh en último lugar. La calefacción debería mostrar un valor mucho más elevado en esta figura, sin embargo el período de estudio y las temperaturas excepcionalmente altas de éste, han impedido que la instalación estuviera más tiempo en funcionamiento.

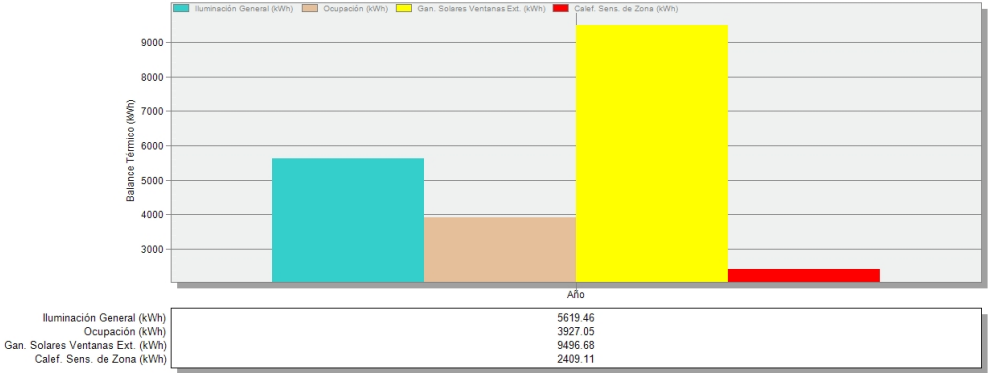


Figura 117. Ganancias internas y solares totales durante el período de estudio en el C.E.I.P. Fabián y Fuero.

En la figura 118 se puede ver la progresión en la demanda de calefacción del edificio, comenzando en 9,70 kWh y terminando en diciembre con 1742,78 kWh. No existe demanda de refrigeración durante el período de estudio, además de que el edificio no dispone de instalación de refrigeración.

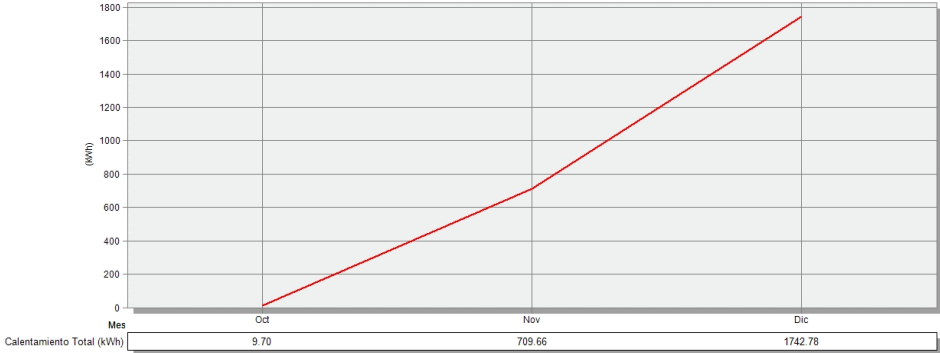


Figura 118. Demanda de calefacción mensual durante el período de estudio en el C.E.I.P. Fabián y Fuero.

Como muestra la figura 119 la gran mayoría del consumo energético va a parar a la instalación de la iluminación por la misma razón anteriormente mencionada, del período en el que el estudio fue llevado a cabo.

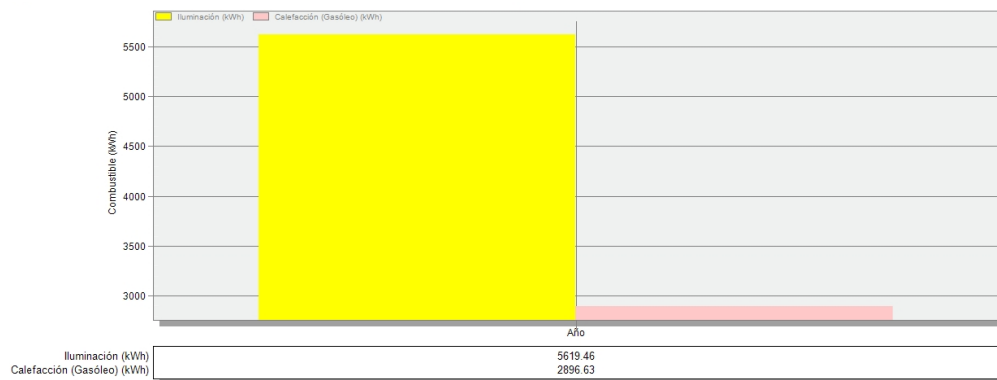


Figura 119. Consumos totales durante el período de estudio en el C.E.I.P. Fabián y Fuero.

Intentando profundizar más en detalle en el conocimiento energético del edificio, y siguiendo la estructura del análisis anterior, se han simulado también las semanas y días con las temperaturas más extremas. Esto permite averiguar la respuesta del edificio y sus instalaciones en las condiciones más desfavorables, calculando temperaturas interiores, el coeficiente de confort de Fanger y el número de horas de desconfort.

Como muestra la figura 120 la semana con las temperaturas más cálidas fue la del 1 al 8 de octubre de 2015, con temperaturas y humedades rozando en varias ocasiones los 30°C y el 80%, respectivamente. Sin embargo, las temperaturas interiores prácticamente no alcanzan los 26°C ni bajan de los 20°C, por lo que se consideran aceptables según los valores del INSHT [118]. Respecto a los niveles de confort térmico, son aceptables aunque podrían ser mejorados sustancialmente.

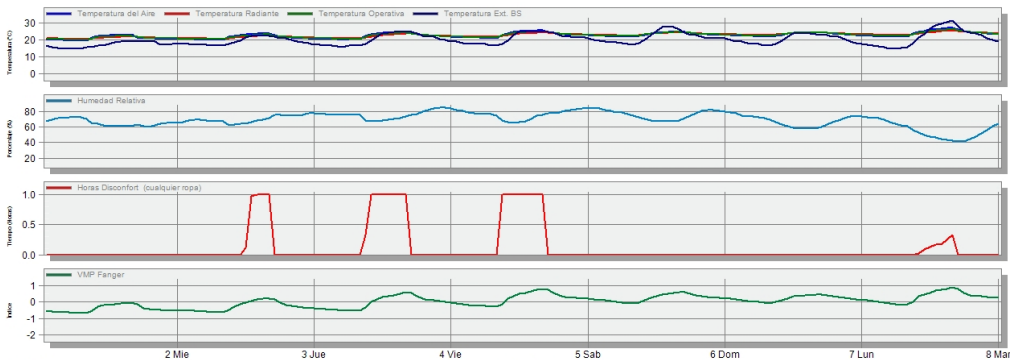


Figura 120. Datos de confort horario durante la semana con las temperaturas más altas (1-8 de Octubre de 2015) del período de estudio en el C.E.I.P. Fabián y Fuero.

Por su parte, durante la semana más fría del estudio las temperaturas interiores se ven totalmente condicionadas al funcionamiento de la calefacción. Sin embargo, las temperaturas no caen demasiado cuando la climatización no está operativa, gracias a la gran inercia del edificio. Tal y como comentaban los maestros en sus opiniones, los niveles de confort térmico son buenos en general, aunque existen momentos al principio del día que el edificio se encuentra demasiado frío, y otros, en el centro del día, en los que las temperaturas son demasiado altas. Esto se puede observar en las de discomfort en la figura 121.

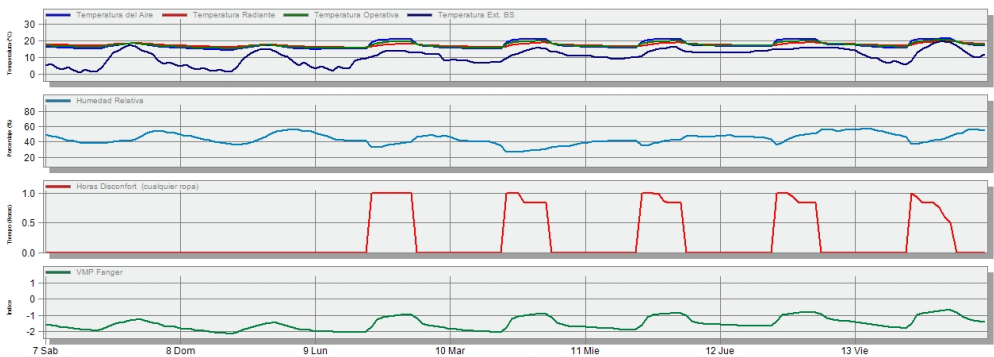


Figura 121. Datos de confort horario durante la semana con las temperaturas más bajas (7-14 de Diciembre de 2015) del período de estudio en el C.E.I.P. Fabián y Fuero.

Para continuar con la misma estructura analítica anterior, también se han simulado en profundidad los días con las temperaturas más desfavorables. En la figura 122 se observa los resultados de confort para el día 5 de octubre de 2015,

como día más caluroso, durante el período de estudio. Se puede comprobar que los valores de confort son muy altos, manteniendo las temperaturas por encima de 20°C, con picos llegando a los 30°C, y las humedades presentan porcentajes ligeramente elevados. Sin embargo, las horas de disconfort son nulas y el coeficiente VMP de Fanger es prácticamente 0 durante toda la semana.

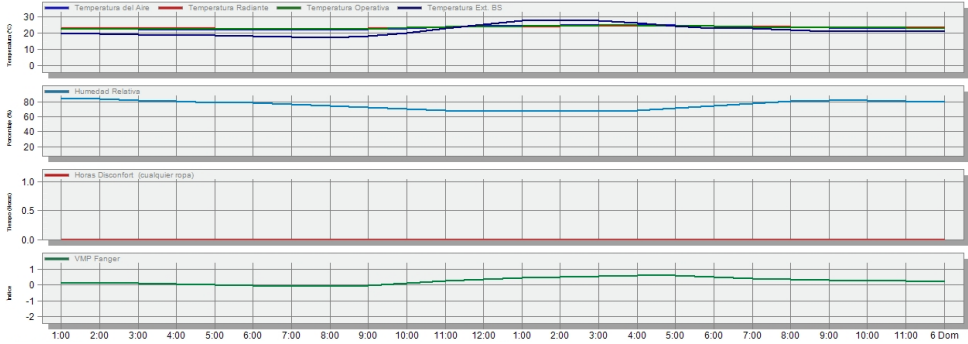


Figura 122. Datos de confort horario durante el día con las temperaturas más altas (5 de Octubre de 2015) del período de estudio en el C.E.I.P. Fabián y Fuero.

Por su parte, durante la semana con las temperaturas más frías (23 de noviembre de 2015), las horas de disconfort vuelven a resultar 0 gracias a que el edificio con el sistema de calefacción mantiene las temperaturas entorno a los 20°C con humedades menores del 60% (figura 123).

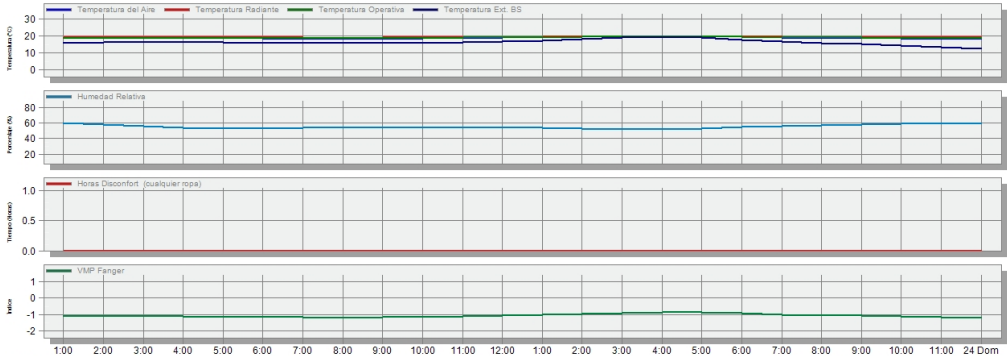


Figura 123. Datos de confort horario durante el día con las temperaturas más bajas (23 de Noviembre de 2015) del período de estudio en el C.E.I.P. Fabián y Fuero.

Ya para finalizar este análisis de la simulación energética del CEIP Fabián y Fuero de Villar del Arzobispo, se han extraído las siguientes deducciones:

- Las ganancias principales son las solares, a pesar que el sistema de calefacción marca claramente el comportamiento térmico del edificio. Esto es debido a que durante el período de estudio esta instalación ha permanecido la mayor parte del tiempo sin funcionar.
- Tan solo existe demanda energética de calefacción.
- El comportamiento del edificio en cuanto al confort interior es muy elevado.
- Las temperaturas interiores son las recomendadas por el INSHT en la gran mayoría del tiempo, exceptuando algunos períodos en los que se escapan ligeramente de este rango.

4.2.4. Optimización / Rehabilitación Energética del C.E.I.P. Fabián y Fuero

Una vez analizados los resultados de la toma de datos meteorológicos, interiores, del estudio estadístico del confort térmico (de adultos y alumnos), y de las simulaciones energéticas del apartado anterior, se ha llegado a la conclusión de que existen aspectos en lo que se puede mejorar el comportamiento energético del edificio. Asumido esto, se ha realizado un estudio de cuales serían las modificaciones necesarias y en que parámetros serían llevadas a cabo.

Como en el caso anterior, se ha iniciado esta implementación por las zonas del edificio con mayor potencial de mejora, es decir, la más débil energéticamente, en este caso los vidrios. El edificio dispone de un considerable porcentaje de huecos en sus fachadas, en los cuales están instalados unos vidrios con una transmitancia tan baja como $5,778 \text{ W/m}^2\text{k}$. Los marcos de madera al pertenecer a la remodelación que se realizó en 1963 se han mantenido, cambiando tan sólo el vidrio, aunque obviamente adaptándose el marco al nuevo

espesor del vidrio. Se han propuesto cuatro diferentes vidrios para instalarse, los cuales se pueden ver sus transmitancias en la tabla 21.

Tabla 21. . Valores de transmitancia de los diferentes vidrios propuestos para instalar en el C.E.I.P. Fabián y Fuero.

Tipo de vidrio	Transmitancia (U)
Vidrio Doble 6+6 Clr	3,094 W/m ² k
Vidrio Doble 6+13 Clr	2,665 W/m ² k
Triple 3+13 Clr	1,757 W/m ² k
Triple 3+13 LoE	0,982 W/m ² k

En la figura 124 se observa el comportamiento energético del edificio con los vidrios actuales, comparado con la respuesta del mismo con los cuatro vidrios propuestos. La demanda de calefacción, las horas de disconfort y el consumo total son calculados para valorar en profundidad cada opción propuesta.

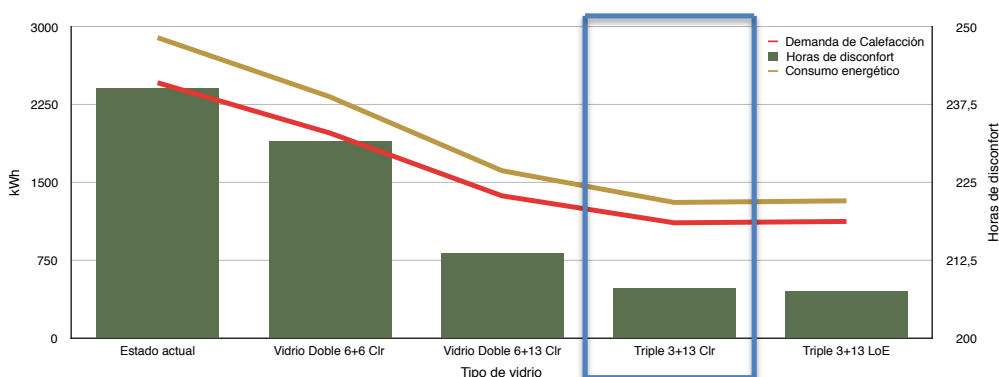


Figura 124. Comparativa de la demanda energética, horas de disconfort y consumo energético del C.E.I.P. Fabián y Fuero durante el período de estudio con las diferentes propuestas de vidrios.

Se ha optado por instalar un vidrio triple 3+13 Clr con una transmitancia de 1,757 W/m²k. Con esta mejora se consigue un reducción de la demanda de calefacción del 55%, un 14% en horas de disconfort y otro 55% en consumo energético.

A continuación, se ha planteado la adición de una capa de aislamiento de lana de mineral a la cubierta. La transmitancia de la cubierta con los diferentes espesores se puede ver en la tabla 22.

Tabla 22. . Valores de transmitancia de la cubierta según los diferentes espesores de lana mineral propuestos para instalar en el C.E.I.P. Fabián y Fuero.

Espesor	Transmitancia (U)
Lana mineral 3 cm	0,764 W/m ² k
Lana mineral 5 cm	2,665 W/m ² k
Lana mineral 8 cm	1,757 W/m ² k
Lana mineral 10 cm	0,982 W/m ² k

Como en la modificación anterior, se ha realizado una comparativa del comportamiento energético del edificio con los distintos espesores de aislamiento. En la figura 125 se pueden ver estos datos junto a los valores dados en el paso 1 (vidrios) de estas mejoras propuestas.

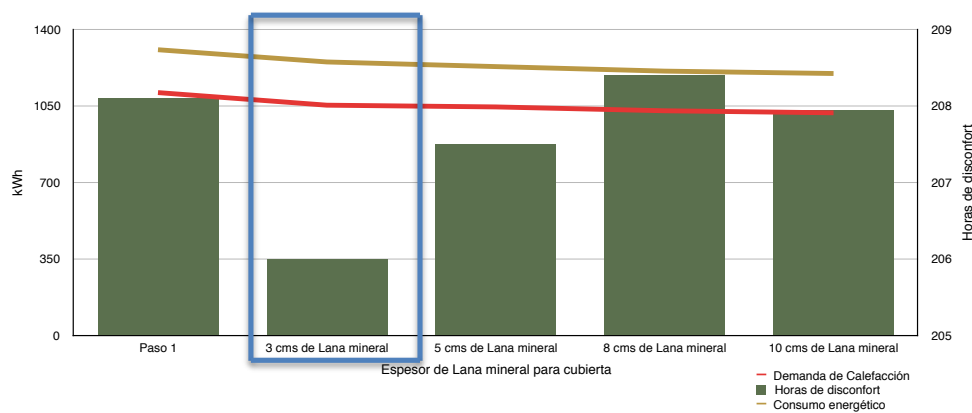


Figura 125. Comparativa de la demanda energética, horas de disconfort y consumo energético del C.E.I.P. Fabián y Fuero durante el período de estudio con las diferentes propuestas de los espesores de aislamiento de lana de mineral para la cubierta.

Los resultados han sido muy claros una vez más y se ha optado por instalar un aislamiento de lana mineral con un espesor de 3 cm. que implementa la transmitancia de la cubierta al valor de 0,764 W/m²k. Implementando esta medida se consigue una mejora de un 6% en la demanda de calefacción, un 2% en las horas de disconfort y un 5% en el consumo total del edificio.

Ya como última propuesta de mejora del comportamiento energético del centro, se estudia la remodelación de la solera del edificio añadiendo una capa de aislamiento de panel de caucho para mejorar la envolvente al completo. Como en los casos anteriores, se analiza el comportamiento de la solera con los

diferentes espesores del nuevo aislamiento. En la tabla 23 se pueden ver las transmitancias de la solera con los diferentes espesores.

Tabla 23. . Valores de transmitancia de la solera según los diferentes espesores de panel de caucho propuestos para instalar en el C.E.I.P. Fabián y Fuero.

Espesor	Transmitancia (U)
Panel de caucho 3 cm	0,876 W/m ² k
Panel de caucho 5 cm	0,785 W/m ² k
Panel de caucho 8 cm	0,678 W/m ² k

Los resultados de las simulaciones con los diferentes espesores de aislamiento se muestran en la figura 126. Se ha decidido implementar la solución con el espesor de 5 cm por mantener un equilibrio entre mejora del comportamiento energético y espesor instalado.

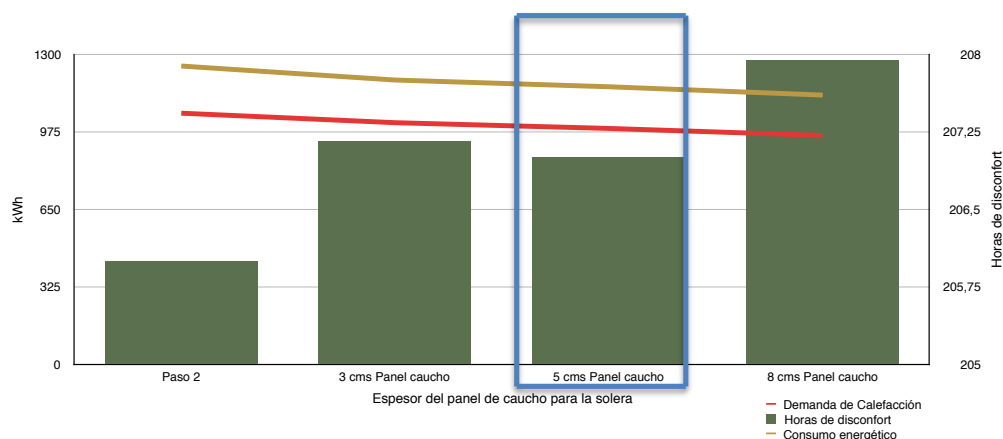


Figura 126. Comparativa de la demanda energética, horas de disconfort y consumo energético del C.E.I.P. Fabián y Fuero durante el período de estudio con las diferentes propuestas de los espesores de aislamiento de panel de caucho para la solera.

Se puede comprobar que existe una reducción nada despreciable de un 7% del paso 2 (aislamiento en cubierta) en lo que se refiere a la demanda de calefacción, otro 7% en consumo total, aunque las horas de disconfort se han incrementado en un insignificante 1%.

Para finalizar con el análisis de las propuestas de mejora, se han comparado los valores del estado original con los de la propuesta (incorporando las tres

medidas implementadas). Los resultados se pueden ver en la figura 127. Se han alcanzado reducciones del 60% en demanda de calefacción, un 14% en horas de disconfort y otro 60% en consumo total.

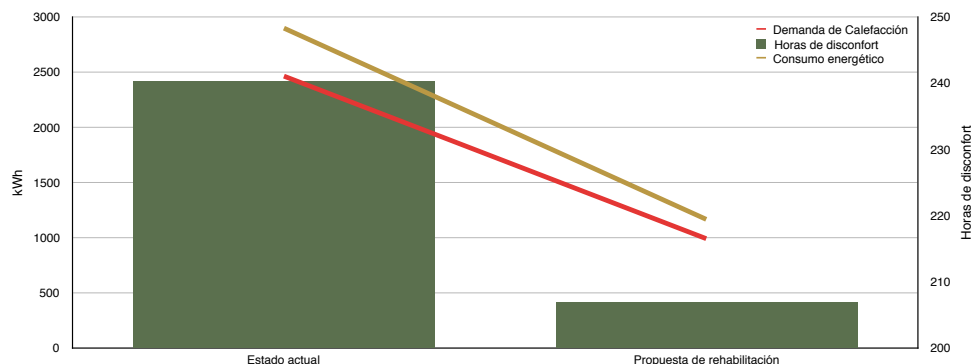


Figura 127. Comparativa de la demanda energética, horas de disconfort y consumo energético del C.E.I.P. Fabián y Fuego durante el período de estudio entre el estado actual y la propuesta final.

Estas propuestas han resultado enormemente productivas en cuanto a ahorro energético, ya que en el aspecto de confort térmico el edificio presentaba valores muy altos. Una vez más, las actuaciones planteadas en este apartado han sido consideradas una vez su implementación no ha modificado en ningún momento el patrimonio histórico del edificio. La adición del aislamiento en la cubierta ha sido realizada por la parte interior donde se encuentra el bajo cubierta, y en lo que respecta a la solera, el pavimento interior ha sido modificado recientemente por lo que una nueva actuación no comprometería ningún valor patrimonial del edificio. Por último, la sustitución de los vidrios supondría una modificación de los marcos de madera para encaja la nueva dimensión de los mismos. Sin embargo, esta actuación puede ser realizada manteniendo la estética de conjunto de las ventanas, que es lo que desde el ayuntamiento se ha hecho hincapié, asimismo, en los marcos no reside un valor patrimonial ni histórico de especial valor.



Conclusiones

Las estrategias, proyectos e ideas que se muestran en esta tesis proporcionan ejemplos útiles para ciudades y gobiernos de todo el mundo. Una correcta rehabilitación energética de edificios patrimoniales, sin duda, contribuye a mantener el legado cultural e histórico, la reducción de las emisiones de carbono y el consumo de energía, mejora el desarrollo sostenible y el confort térmico interior. Por lo tanto, debemos asumir nuestra responsabilidad y conservar el patrimonio construido para las generaciones futuras; la mejor manera de lograr este objetivo es manteniendo los edificios históricos en uso, adaptándolos a los nuevos estándares y normativas ambientales.

Síntesis de los Resultados Más Importantes

La revisión bibliográfica ha revelado que en los dos últimos lustros el interés y las investigaciones sobre eficiencia energética y confort térmico en edificios patrimoniales se han multiplicado. Sin embargo, este propósito resulta ser un gran desafío ya que implementar las técnicas y medidas de eficiencia energética y el confort térmico, sin comprometer el valor histórico, no es tarea sencilla. En consecuencia, todos los agentes involucrados en este proceso como ingenieros, arquitectos, arquitectos técnicos, historiadores, restauradores, administración y particulares, deben colaborar conjuntamente para alcanzar este objetivo. Aun así, responder a las exigencias de todos los involucrados en el procedimiento es muy complicado.

Europa, y más concretamente Italia, es la región con mayor interés en el desarrollo de políticas de adaptación de los edificios patrimoniales a los nuevos estándares de sostenibilidad y confort. Italia, como el país con mayor patrimonio mundial, lidera el número de investigaciones. El 73% de estos trabajos tienen como propósito principal mejorar la eficiencia energética y confort térmico. Por otro lado, tanto las construcciones de los siglos XIX y XX, por su mayor accesibilidad y menor protección, como los usos residencial, museístico y religioso, resultan ser los casos de estudio más comúnmente utilizados.

Por otra parte, existen diferentes directrices o guías para afrontar la auditoría energética de un edificio. Estas auditorías son unas herramientas analíticas de gran interés en el proceso de toma de decisiones dentro de la gestión de edificios. La utilidad de una auditoría energética depende de la capacidad de hacer eficaz la información de la cual se dispone. Estos análisis pueden realizarse desde diferentes puntos de vista, y a diferentes niveles de detalle, por ello es importante realizarlos de manera apropiada con el fin de averiguar los aspectos realmente importantes que nos permitan alcanzar los objetivos marcados. La metodología propuesta comienza con un estudio exhaustivo del edificio, su entorno y sus usuarios, con el fin de disminuir las incertidumbres de los aspectos principales que contribuyen al consumo

energético y al confort térmico. Esta tesis se ha centrado, además de en el análisis de las investigaciones más relevantes, en dos casos de estudio estudiados para ofrecer al lector una visión práctica de las posibilidades de la metodología planteada. La recopilación de los diversos datos para el entendimiento del comportamiento de los edificios ha resultado capital, desde el estudio estadístico del confort térmico hasta la caracterización de la envolvente pasando por las diferentes monitorizaciones y simulaciones energéticas. Sintetizar esta información en la construcción de los dos modelos dinámicos resulta ser una manera muy eficaz de abordar la toma de decisiones, comprobar la eficacia de las soluciones propuestas y de comparar el comportamiento real y simulado para medir la incertidumbre de cálculo.

Ambos estudios experimentales presentados en esta tesis están relacionados con dos edificios históricos que en ambos casos, han resultado más eficientes de lo esperado. Existen técnicas y estrategias de eficiencia energética y confort térmico aplicados a edificios de nueva construcción, que pueden ser perfectamente adaptados a construcciones históricas simplemente teniendo en cuenta el nivel de protección y las características específicas del edificio antes de ser implementadas. La metodología presentada en esta tesis ha pretendido dar un paso en la aplicación de estas soluciones. Como consecuencia de la utilización de esta metodología se consigue un mejor balance energético, un avance en el proceso de rehabilitación del edificio y una gestión más eficiente de los recursos energéticos utilizados. Por otra parte, el procedimiento busca mejorar el comportamiento energético de unos edificios que ya de por sí se comportan relativamente de manera eficiente, y se sugiere que es posible alcanzar un comportamiento aún mayor si se aplicara esta metodología a una construcción ineficiente. Como resultado de la optimización del diseño y la rehabilitación energética de ambos edificios, se alcanza una reducción del 60% de la demanda y el consumo en el caso de C.E.I.P. Fabián y Fuero y un 20% en el Museo de Historia de Valencia, además de la mejora del confort térmico interior en un 14% y un 3%, respectivamente. Este resultado confirma que los objetivos de otras investigaciones similares analizadas al principio de esta tesis han sido también alcanzados en este estudio.

Futuras Líneas de Trabajo

Para finalizar esta tesis, se proponen líneas de trabajo e investigación en las que se ha considerado interesante profundizar en el desarrollo de esta metodología para la mejora de la eficiencia energética y el confort térmico en edificios históricos.

- Al modelo propuesto se propone añadir:
 - Estudio termográfico de las fachadas para poder identificar defectos y puentes térmicos que puedan afectar al modelo energético.
 - Medición “in situ” de los valores de transmitancia de los cerramientos de los casos de estudio.
 - Análisis de fluidos con programas “Computational Fluid Dynamics” (CFD) para estudiar el comportamiento de los flujos de aire creados por las instalaciones de climatización.
 - Extender los períodos de estudio hasta conseguir un año completo de monitorización interior y exterior, y estudio estadístico de confort térmico interior. Esta ampliación daría una visión completa de las necesidades de los edificios afectados por una rehabilitación energética.
- Propuesta de un método abreviado para la certificación energética de edificios históricos y patrimoniales.
- Propuesta de una metodología específica para centros docentes donde el objetivo sea conseguir un confort térmico óptimo de los alumnos y profesores en edificios históricos que alberguen centros docentes.



Conclusions

Strategies, projects and ideas that are shown in this thesis provide useful examples for cities and governments around the world. A correct energy rehabilitation of heritage buildings undoubtedly contributes to maintaining cultural and historical legacy, the reduction of carbon emissions and energy consumption and to the improvement of sustainable development and interior thermal comfort. Therefore, we must assume our responsibility and preserve the heritage built for future generations; the best way to achieve this is by keeping historic buildings in use, adapting them to the new standards and implementing environmental regulations.

Synthesis of the most important results

The literature review has revealed that, in the last two decades, the interest and research on energy efficiency and thermal comfort in heritage buildings has multiplied. However, this interest poses a great challenge because implementing the techniques and measures of energy efficiency and thermal comfort without compromising the historical value is not a simple task. Consequently, all of the agents involved in this process, such as engineers architects, technical architects, historians, restorers, administration and private individuals, should work together to achieve the goal. Even so, responding to the demands of all those involved in the procedure is very complicated.

Europe is the region that has showed the greatest interest in developing policies for adapting heritage buildings to new standards of comfort and sustainability. Italy, being the country with most world heritage, leads the number of investigations performed in this field. 73% of the research conducted was aimed at improving energy efficiency and thermal comfort in historic buildings. Additionally, since buildings from the 19th and 20th centuries enjoy greater accessibility and less historical protection, residential and religious buildings and museum were the most common case study subjects from the said time period.

The literary review also revealed that there are guidelines addressing energy audits of buildings. These audits are useful analytical tools in the process of decision-making for the management of buildings. The usefulness of an energy audit depends on the effectiveness of the information that it reveals. These analyses can be done from different perspectives and at different levels of detail, so proper adherence to the guidelines is crucial in order to yield the results that will be useful to for the objective for which an audit was performed. The proposed methodology begins with a comprehensive study of the building, including its environment and its users, in order to reduce the uncertainties of the main aspects that contribute to energy consumption and thermal comfort. This thesis focuses, in addition to the analysis of the relevant research, on two case studies designed to give the reader a practical understanding of the

proposed methodology. From a thermal comfort statistical analysis to the characterization of a building envelope through different monitors and simulations, the data used for building examination is crucial for a comprehensive understanding of the buildings' energy performances. The information is summarized in two dynamic models and turns out to be very effective in dealing with decision-making, ensuring the effectiveness of the proposed solutions and comparing real and simulated behavior to measure the uncertainty of calculation.

Both experimental studies presented in this thesis relate to two historic buildings that, in both cases, have proved to be more efficient than expected. There are techniques and strategies for energy efficiency and thermal comfort applied to new buildings, which can be perfectly adapted to historical buildings by simply taking into account the level of protection and specific features of the building. The methodology presented in this thesis takes a step toward the implementation of these solutions. As a result of the use of this methodology, a better energy balance is achieved, a step toward the conservation of the building is taken and a more efficient management of energy resources is used. Moreover, the procedure seeks to improve the behavior of energy of some buildings even if they behave relatively efficiently already; the research suggests that it is possible to achieve even greater performance if this methodology is applied. As a result of the optimization design and energy rehabilitation of both buildings, a reduction of 20% in the Museum of History of Valencia, as well as the improvement of the indoor thermal comfort by 14% and 3%, and 60% of the demand and consumption in the case of C.E.I.P. Fabián y Fuero reached similar results. The results of these two case studies confirm the objectives of other similar researches and reach similar conclusions.

Future Research Lines

To finalize this thesis, new lines of work and research are considered. These proposed investigations delve into the development of the methodology for the improving the energy efficiency and thermal comfort in historical buildings. They are as follows:

- A new research model including the following elements:
 - A facade thermographic study to identify defects and thermal bridges that could affect the energy model.
 - "In situ" measurement values of transmittance of the enclosures for use in the case studies.
 - Analysis of fluids using "Computational Fluid Dynamics" (CFD) programs to study the behavior of airflows created by air conditioning installations.
 - Extension studies monitoring indoor and outdoor thermal conditions for the duration of a full year. The prolonged observation would give a complete view of the buildings with energy rehabilitation needs.
- A proposal to implement a shortcut for the energy certification of historical buildings.
- A proposal for a specific methodology for historic educational centers, where the aim is to achieve optimal thermal comfort levels for students and teachers.



Bibliografía

- [1] International Energy Agency. *Key World Energy Statistics*. 2014.
- [2] *Buildings and climate change*. Paris: 2009.
- [3] U.S. Environmental Protection Agency (EPA). *Energy Star. Energy Efficient Mortgages* n.d.
https://www.energystar.gov/index.cfm?c=mortgages.energy_efficient_mortgages.
- [4] Amecke H, Deason J, Hobbs A, Novikova A, Xiu Y, Shengyuan Z. *Buildings Energy Efficiency in China, Germany, and the United States*. Climate Policy Initiative. San Francisco: 2013.
- [5] Community E. *Council Directive 93/76/EEC to limit carbon dioxide emissions by improving energy efficiency (SAVE)*. 1993.
- [6] *Europe 2020*. Europe: 2010.
- [7] Fabbri K. *Energy incidence of historic building: Leaving no stone unturned*. *J Cult Herit* 2013;14:e25-7. doi:10.1016/j.culher.2012.12.010.

- [8] International Energy Agency. [Http://www.iea.org](http://www.iea.org) 2015.
- [9] Directive 2012/27/EU of the European Parliament and of the Council of 25 October 2012. 2012.
- [10] Paliaga G, Schoen LJ, Alspach PF, Arens E a, Aynsley RM, Bean R, et al. Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy. ASHRAE 2013;ASHRAE Sta:58. doi:ISSN 1041-2336.
- [11] Troi A. Historic buildings and city centres – the potential impact of conservation compatible energy refurbishment on climate protection and living conditions. *Energy Manag Cult Herit* 2011.
- [12] New Europe Brussels team. Employment up 11% thanks to cultural tourism 2008. <http://www.neurope.eu/article/employment-11-thanks-cultural-tourism>.
- [13] Clark A. Assembly of European Regions. Cult Tour Futur Sustain Dev within Eur Reg 2008. <http://aer.eu/cultural-tourism-the-future-of-sustainable-development-within-europes-regions/>.
- [14] Prömmel A. Increased energy efficiency in existing buildings. *Habitat Int* 1978;3:569-75. doi:10.1016/0197-3975(78)90020-6.
- [15] Johnsen K. Energy conservation in the built environment. *Build Environ* 1980;15:203.
- [16] Theis C. Saving energy in old buildings. *Passiv Low Energy Altern* 1982;1:51-8.
- [17] Gail C. ENERGY CONSERVATION IN MUSEUMS AND HISTORIC BUILDINGS. *ASHRAE J* 1983;25 (8):32-7.
- [18] Jankovich B, P. Puccetti. BUILDING REHABILITATION WITH RETROFIT OF PASSIVE AND LOW ENERGY SYSTEMS 1983:1983.
- [19] Butera, F., D'Orso, A., Farruggia, S., Rizzo, G., Silvestrini G. ENERGY CONSERVATION IN 29 HISTORIC SCHOOL BUILDINGS IN PALERMO 1985.
- [20] Tiwari GN, Lugani N, Singh AK, Garg HP. Performance studies of a passively cooled mahal. *Energy Build* 1995;22:91-9. doi:10.1016/0378-7788(94)00906-Z.
- [21] Brown W. C, Shirlcliffe C. J, Maurenbrecher AH. HP, building envelope of a heritage house: a case study. *Energy Build* 1999;30:211-9. doi:10.1016/S0378-7788(98)00031-0.
- [22] Camuffo D, Brimblecombe P, Van Grieken R, Busse H-J, Sturaro G, Valentino A, et al. Indoor air quality at the Correr Museum, Venice, Italy. *Sci Total Environ* 1999;236:135-52. doi:10.1016/S0048-9697(99)00262-4.

- [23] Martín Ocaña S, Cañas Guerrero I, González Requena I. Thermographic survey of two rural buildings in Spain. *Energy Build* 2004;36:515-23. doi:10.1016/j.enbuild.2003.12.012.
- [24] Grinzato E, Bison PG, Marinetti S. Monitoring of ancient buildings by the thermal method. *J Cult Herit* 2002;3:21-9. doi:10.1016/S1296-2074(02)01159-7.
- [25] Ealiwa M., Taki A., Howarth A., Seden M. An investigation into thermal comfort in the summer season of Ghadames, Libya. *Build Environ* 2001;36:231-7. doi:10.1016/S0360-1323(99)00071-2.
- [26] Gysels K, Delalieux F, Deutsch F, Van Grieken R, Camuffo D, Bernardi A, et al. Indoor environment and conservation in the Royal Museum of Fine Arts, Antwerp, Belgium. *J Cult Herit* 2004;5:221-30. doi:10.1016/j.culher.2004.02.002.
- [27] Camuffo D. Environmental monitoring in four European museums. *Atmos Environ* 2001;35:127-40. doi:10.1016/S1352-2310(01)00088-7.
- [28] Pavlogeorgatos G. Environmental parameters in museums. *Build Environ* 2003;38:1457-62. doi:10.1016/S0360-1323(03)00113-6.
- [29] Hanna R. Environmental appraisal of historic buildings in Scotland: the case study of the Glasgow School of Art. *Build Environ* 2002;37:1-10. doi:10.1016/S0360-1323(00)00099-8.
- [30] Costanzo S, Cusumano A, Giaconia C, Giaconia G. Preservation of the artistic heritage within the seat of the Chancellorship of the University of Palermo. *Build Environ* 2006;41:1847-59. doi:10.1016/j.buildenv.2005.06.010.
- [31] LOUPA G, CHARPANTIDOU E, KIOUTSIOUKIS I, RAPSOMANIKIS S. Indoor microclimate, ozone and nitrogen oxides in two medieval churches in Cyprus. *Atmos Environ* 2006;40:7457-66. doi:10.1016/j.atmosenv.2006.07.015.
- [32] Bencs L, Spolnik Z, Limpens-Neilen D, Schellen HL, Jütte BAHG, Van Grieken R. Comparison of hot-air and low-radiant pew heating systems on the distribution and transport of gaseous air pollutants in the mountain church of Rocca Pietore from artwork conservation points of view. *J Cult Herit* 2007;8:264-71. doi:10.1016/j.culher.2007.05.001.
- [33] Samek L, De Maeyer-Worobiec A, Spolnik Z, Bencs L, Kontozova V, Bratasz Ł, et al. The impact of electric overhead radiant heating on the indoor environment of historic churches. *J Cult Herit* 2007;8:361-9. doi:10.1016/j.culher.2007.03.006.
- [34] Corgnati SP, Fabi V, Filippi M. A methodology for microclimatic quality evaluation in museums: Application to a temporary exhibit. *Build Environ* 2009;44:1253-60. doi:10.1016/j.buildenv.2008.09.012.

- [35] Zítek P, Vyhliđal T. Model-based moisture sorption stabilization in historical buildings. *Build Environ* 2009;44:1181–7. doi:10.1016/j.buildenv.2008.08.014.
- [36] Cardinale T, Colapietro D, Cardinale N, Fatiguso F. Evaluation of the Efficacy of Traditional Recovery Interventions in Historical Buildings. A New Selection Methodology. *Energy Procedia* 2013;40:515–24. doi:10.1016/j.egypro.2013.08.059.
- [37] Zagorskas J, Zavadskas EK, Turskis Z, Burinskienė M, Blumberga A, Blumberga D. Thermal insulation alternatives of historic brick buildings in Baltic Sea Region. *Energy Build* 2014;78:35–42. doi:10.1016/j.enbuild.2014.04.010.
- [38] Yung EHK, Chan EHW. Implementation challenges to the adaptive reuse of heritage buildings: Towards the goals of sustainable, low carbon cities. *Habitat Int* 2012;36:352–61. doi:10.1016/j.habitatint.2011.11.001.
- [39] Tagliabue LC, Leonforte F, Compostella J. Renovation of an UNESCO Heritage Settlement in Southern Italy: ASHP and BIPV for a “Spread Hotel” Project. *Energy Procedia* 2012;30:1060–8. doi:10.1016/j.egypro.2012.11.119.
- [40] Morelli M, Rønby L, Mikkelsen SE, Minzari MG, Kildemoes T, Tommerup HM. Energy retrofitting of a typical old Danish multi-family building to a “nearly-zero” energy building based on experiences from a test apartment. *Energy Build* 2012;54:395–406. doi:10.1016/j.enbuild.2012.07.046.
- [41] Alev Ü, Eskola L, Arumägi E, Jokisalo J, Donarelli A, Siren K, et al. Renovation alternatives to improve energy performance of historic rural houses in the Baltic Sea region. *Energy Build* 2014;77:58–66. doi:10.1016/j.enbuild.2014.03.049.
- [42] Arumägi E, Kalamees T. Analysis of energy economic renovation for historic wooden apartment buildings in cold climates. *Appl Energy* 2014;115:540–8. doi:10.1016/j.apenergy.2013.10.041.
- [43] Wu Z, Xu J. Predicting and optimization of energy consumption using system dynamics-fuzzy multiple objective programming in world heritage areas. *Energy* 2013;49:19–31. doi:10.1016/j.energy.2012.10.030.
- [44] Moschella A, Salemi A, A LF, Sanfilippo G, Detommaso M, Privitera A. Historic Buildings in Mediterranean Area and Solar Thermal Technologies: Architectural Integration vs Preservation Criteria. *Energy Procedia* 2013;42:416–25. doi:10.1016/j.egypro.2013.11.042.
- [45] Cardinale N, Rospì G, Stefanizzi P. Energy and microclimatic performance of Mediterranean vernacular buildings: The Sassi district of Matera and the Trulli district of Alberobello. *Build Environ* 2013;59:590–8. doi:10.1016/j.buildenv.2012.10.006.

- [46] De Berardinis P, Rotilio M, Marchionni C, Friedman A. Improving the energy efficiency of historic masonry buildings. A case study: A minor centre in the Abruzzo region, Italy. *Energy Build* 2014;80:415–23. doi:10.1016/j.enbuild.2014.05.047.
- [47] Bonomo P, De Berardinis P. PV Integration in Minor Historical Centers: Proposal of Guide-criteria in Post-earthquake Reconstruction Planning. *Energy Procedia* 2014;48:1549–58. doi:10.1016/j.egypro.2014.02.175.
- [48] Bernardi A, Becherini F, Romero-Sanchez MD, Lopez-Buendia A, Vivarelli A, Pockelé L, et al. Evaluation of the effect of phase change materials technology on the thermal stability of Cultural Heritage objects. *J Cult Herit* 2013. doi:10.1016/j.culher.2013.11.002.
- [49] Li Q, You R, Chen C, Yang X. A field investigation and comparative study of indoor environmental quality in heritage Chinese rural buildings with thick rammed earth wall. *Energy Build* 2013;62:286–93. doi:10.1016/j.enbuild.2013.02.057.
- [50] Tang L, Nikolopoulou M, Zhang N. Bioclimatic design of historic villages in central-western regions of China. *Energy Build* 2014;70:271–8. doi:10.1016/j.enbuild.2013.11.067.
- [51] Sauchelli M, Masera G, D’Antona G, Manzolini G. ISIS Facchinetti: A Nearly Zero Energy Retrofit in Italy. *Energy Procedia* 2014;48:1326–35. doi:10.1016/j.egypro.2014.02.150.
- [52] Buvik K, Andersen G, Tangen S. Ambitious Renovation of a Historical School Building in Cold Climate. *Energy Procedia* 2014;48:1442–8. doi:10.1016/j.egypro.2014.02.163.
- [53] de Santoli L, Fraticelli F, Fornari F, Calice C. Energy performance assessment and a retrofit strategies in public school buildings in Rome. *Energy Build* 2014;68:196–202. doi:10.1016/j.enbuild.2013.08.028.
- [54] Maahsen-Milan A, Fabbri K. Energy restoration and retrofitting. Rethinking restoration projects by means of a reversibility/sustainability assessment. *J Cult Herit* 2013;14:e41–4. doi:10.1016/j.culher.2012.12.011.
- [55] D’Agostino D, Congedo PM, Cataldo R. Ventilation Control using Computational Fluid-dynamics (CFD) Modelling for Cultural Buildings Conservation. *Procedia Chem* 2013;8:83–91. doi:10.1016/j.proche.2013.03.012.
- [56] Woroniak G, Piotrowska-Woroniak J. Effects of pollution reduction and energy consumption reduction in small churches in Drohiczyn community. *Energy Build* 2014;72:51–61. doi:10.1016/j.enbuild.2013.12.048.

- [57] Martins AMT, Carlos JS. The retrofitting of the Bernardas' Convent in Lisbon. *Energy Build* 2014;68:396-402. doi:10.1016/j.enbuild.2013.07.087.
- [58] Varas-Muriel MJ, Martínez-Garrido MI, Fort R. Monitoring the thermal-hygrometric conditions induced by traditional heating systems in a historic Spanish church (12th-16th C). *Energy Build* 2014;75:119-32. doi:10.1016/j.enbuild.2014.01.049.
- [59] Ozay N. A comparative study of climatically responsive house design at various periods of Northern Cyprus architecture. *Build Environ* 2005;40:841-52. doi:10.1016/j.buildenv.2004.08.024.
- [60] Sibley M, Sibley M. Hybrid Green Technologies for Retrofitting Heritage Buildings in North African Medinas: Combining Vernacular and High-tech Solutions for an Innovative Solar Powered Lighting System for Hammam Buildings. *Energy Procedia* 2013;42:718-25. doi:10.1016/j.egypro.2013.11.074.
- [61] Nguyen A-T, Tran Q-B, Tran D-Q, Reiter S. An investigation on climate responsive design strategies of vernacular housing in Vietnam. *Build Environ* 2011;46:2088-106. doi:10.1016/j.buildenv.2011.04.019.
- [62] Tang L, Nikolopoulou M, Zhao F, Zhang N. CFD modeling of the built environment in Chinese historic settlements. *Energy Build* 2012;55:601-6. doi:10.1016/j.enbuild.2012.09.025.
- [63] Kamaruzzaman SN, Egbu CO, Zawawi EMA, Ali AS, Che-Ani AI. The effect of indoor environmental quality on occupants' perception of performance: A case study of refurbished historic buildings in Malaysia. *Energy Build* 2011;43:407-13. doi:10.1016/j.enbuild.2010.10.003.
- [64] Johansson P, Geving S, Hagentoft C-E, Jelle BP, Rognvik E, Kalagasidis AS, et al. Interior insulation retrofit of a historical brick wall using vacuum insulation panels: Hygrothermal numerical simulations and laboratory investigations. *Build Environ* 2014;79:31-45. doi:10.1016/j.buildenv.2014.04.014.
- [65] Balocco C. Daily natural heat convection in a historical hall. *J Cult Herit* 2007;8:370-6. doi:10.1016/j.culher.2007.04.004.
- [66] Balocco C, Calzolari R. Natural light design for an ancient building: A case study. *J Cult Herit* 2008;9:172-8. doi:10.1016/j.culher.2007.07.007.
- [67] Balocco C, Grazzini G. Numerical simulation of ancient natural ventilation systems of historical buildings. A case study in Palermo. *J Cult Herit* 2009;10:313-8. doi:10.1016/j.culher.2008.03.008.
- [68] Balocco C, Grazzini G. Plant refurbishment in historical buildings turned into museum. *Energy Build* 2007;39:693-701. doi:10.1016/j.enbuild.2006.06.012.

- [69] Boeri A, Antonini E, Longo D, Roversi R. The Redevelopment of The Heritage of Social Housing in Italy: Survey and Assessment Instruments. The Case Study of Pilastro Neighborhood in Bologna. *Procedia Eng* 2011;21:997-1005. doi:10.1016/j.proeng.2011.11.2105.
- [70] Camuffo D, Pagan E, Rissanen S, Bratasz Ł, Kozłowski R, Camuffo M, et al. An advanced church heating system favourable to artworks: A contribution to European standardisation. *J Cult Herit* 2010;11:205-19. doi:10.1016/j.culher.2009.02.008.
- [71] Cardinale N, Rospi G, Stazi A. Energy and microclimatic performance of restored hypogeous buildings in south Italy: The “Sassi” district of Matera. *Build Environ* 2010;45:94-106. doi:10.1016/j.buildenv.2009.05.017.
- [72] Corgnati SP, Perino M. CFD application to optimise the ventilation strategy of Senate Room at Palazzo Madama in Turin (Italy). *J Cult Herit* 2013;14:62-9. doi:10.1016/j.culher.2012.02.007.
- [73] D’Agostino D, Congedo PM. CFD modeling and moisture dynamics implications of ventilation scenarios in historical buildings. *Build Environ* 2014. doi:10.1016/j.buildenv.2014.05.007.
- [74] Fabbri K, Pretelli M. Heritage buildings and historic microclimate without HVAC technology: Malatestiana Library in Cesena, Italy, UNESCO Memory of the World. *Energy Build* 2014;76:15-31. doi:10.1016/j.enbuild.2014.02.051.
- [75] Fabbri K, Tronchin L, Tarabusi V. Energy Retrofit and Economic Evaluation Priorities Applied at an Italian Case Study. *Energy Procedia* 2014;45:379-84. doi:10.1016/j.egypro.2014.01.041.
- [76] Fabbri K, Zuppiroli M, Ambrogio K. Heritage buildings and energy performance: Mapping with GIS tools. *Energy Build* 2012;48:137-45. doi:10.1016/j.enbuild.2012.01.018.
- [77] Lucchi E. PRESERVATION OF HERITAGE , ENVIRONMENTAL QUALITY AND ENERGY EFFICIENCY : 2010:8.
- [78] Maahsen-Milan A, Simonetti M. Auditoria and Public Halls. The preserved Architectonic Heritage, in the Perspective of Sustainability. *Procedia Eng* 2011;21:711-20. doi:10.1016/j.proeng.2011.11.2069.
- [79] Pretelli M, Ugolini A, Fabbri K. “Historic plants as monuments” preserving, rethinking and re-using historic plants. *J Cult Herit* 2013;14:S38-43. doi:10.1016/j.culher.2012.12.013.

- [80] Stazi F, Vegliò A, Di Perna C, Munafò P. Experimental comparison between 3 different traditional wall constructions and dynamic simulations to identify optimal thermal insulation strategies. *Energy Build* 2013;60:429–41. doi:10.1016/j.enbuild.2013.01.032.
- [81] Cataldo R, De Donno A, De Nunzio G, Leucci G, Nuzzo L, Siviero S. Integrated methods for analysis of deterioration of cultural heritage: The Crypt of “Cattedrale di Otranto.” *J Cult Herit* 2005;6:29–38. doi:10.1016/j.culher.2004.05.004.
- [82] Camuffo D, Pagan E, Bernardi A, Becherini F. The impact of heating, lighting and people in re-using historical buildings: a case study. *J Cult Herit* 2004;5:409–16. doi:10.1016/j.culher.2004.01.005.
- [83] Zinzi M, Agnoli S, Battistini G, Bernabini G. Retrofit of an Existing School in Italy with High Energy Standards. *Energy Procedia* 2014;48:1529–38. doi:10.1016/j.egypro.2014.02.173.
- [84] Ben H, Steemers K. Energy retrofit and occupant behaviour in protected housing: A case study of the Brunswick Centre in London. *Energy Build* 2014. doi:10.1016/j.enbuild.2014.05.019.
- [85] Godwin PJ. Building Conservation and Sustainability in the United Kingdom. *Procedia Eng* 2011;20:12–21. doi:10.1016/j.proeng.2011.11.135.
- [86] Lankester P, Brimblecombe P. Future thermohygro-metric climate within historic houses. *J Cult Herit* 2012;13:1–6. doi:10.1016/j.culher.2011.06.001.
- [87] Moran F, Blight T, Natarajan S, Shea A. The use of Passive House Planning Package to reduce energy use and CO₂ emissions in historic dwellings. *Energy Build* 2014;75:216–27. doi:10.1016/j.enbuild.2013.12.043.
- [88] Moran F, Natarajan S, Nikolopoulou M. Developing a database of energy use for historic dwellings in Bath, UK. *Energy Build* 2012;55:218–26. doi:10.1016/j.enbuild.2012.09.016.
- [89] Wang F, Pichetwattana K, Hendry R, Galbraith R. Thermal performance of a gallery and refurbishment solutions. *Energy Build* 2014;71:38–52. doi:10.1016/j.enbuild.2013.11.059.
- [90] Ward RM, Choudhary R. A bottom-up energy analysis across a diverse urban building portfolio: retrofits for the buildings at the Royal Botanic Gardens, Kew, UK. *Build Environ* 2014;74:132–48. doi:10.1016/j.buildenv.2013.12.018.
- [91] Farreny R, Oliver-Solà J, Escuder-Bonilla S, Roca-Martí M, Seigné E, Gabarrell X, et al. The metabolism of cultural services. Energy and water flows in museums. *Energy Build* 2012;47:98–106. doi:10.1016/j.enbuild.2011.11.050.

- [92] Martínez-Garrido MI, Aparicio S, Fort R, Anaya JJ, Izquierdo MAG. Effect of solar radiation and humidity on the inner core of walls in historic buildings. *Constr Build Mater* 2014;51:383-94. doi:10.1016/j.conbuildmat.2013.10.068.
- [93] Pérez Gálvez F, Rubio de Hita P, Ordóñez Martín M, Morales Conde MJ, Rodríguez Liñán C. Sustainable restoration of traditional building systems in the historical centre of Sevilla (Spain). *Energy Build* 2013;62:648-59. doi:10.1016/j.enbuild.2012.05.009.
- [94] Li Q, Sun X, Chen C, Yang X. Characterizing the household energy consumption in heritage Nanjing Tulou buildings, China: A comparative field survey study. *Energy Build* 2012;49:317-26. doi:10.1016/j.enbuild.2012.02.023.
- [95] Buhagiar, P. Jones V. Refurbishment of historic buildings: Thermal mass modified, its influence on indoor comfort, energy efficiency and heritage value (2011). 27th Int. Conf. Passiv. Low Energy Archit. Archit. Sustain. Dev., 2011, p. 2011.
- [96] Bernardi A, Todorov V, Hristova J. Microclimatic analysis in St. Stephan's church, Nessebar, Bulgaria after interventions for the conservation of frescoes. *J Cult Herit* 2000;1:281-6. doi:10.1016/S1296-2074(00)01084-0.
- [97] Invitalia. Investment Opportunities. Rome: 2012.
- [98] Cantin R, Burgholzer J, Guarracino G, Moujalled B, Tamelikecht S, Royet BG. Field assessment of thermal behaviour of historical dwellings in France. *Build Environ* 2010;45:473-84. doi:10.1016/j.buildenv.2009.07.010.
- [99] Khalili M, Amindeldar S. Traditional solutions in low energy buildings of hot-arid regions of Iran. *Sustain Cities Soc* 2014. doi:10.1016/j.scs.2014.05.008.
- [100] López CSP, Frontini F. Energy Efficiency and Renewable Solar Energy Integration in Heritage Historic Buildings. *Energy Procedia* 2014;48:1493-502. doi:10.1016/j.egypro.2014.02.169.
- [101] Sabrina K. The Identification of the Environment Disposal of the Traditional Algerian Houses. *Energy Procedia* 2013;42:473-82. doi:10.1016/j.egypro.2013.11.048.
- [102] Omar NAM, Syed-Fadzil SF. Assessment of Passive Thermal Performance for a Penang Heritage Shop house. *Procedia Eng* 2011;20:203-12. doi:10.1016/j.proeng.2011.11.157.
- [103] Tassiopoulou T, Grindley PC, Probert SD. Thermal behaviour of an eighteenth-century Athenian dwelling. *Appl Energy* 1996;53:383-98. doi:10.1016/0306-2619(95)00068-2.

- [104] Ascione F, de Rossi F, Vanoli GP. Energy retrofit of historical buildings: theoretical and experimental investigations for the modelling of reliable performance scenarios. *Energy Build* 2011;43:1925–36. doi:10.1016/j.enbuild.2011.03.040.
- [105] Erhorn-Kluttig H, Erhorn H. School of the Future – Towards Zero Emission with High Performance Indoor Environment. *Energy Procedia* 2014;48:1468–73. doi:10.1016/j.egypro.2014.02.166.
- [106] Mørck OC, Paulsen AJ. Energy Saving Technology Screening within the EU-project “School of the Future.” *Energy Procedia* 2014;48:1482–92. doi:10.1016/j.egypro.2014.02.168.
- [107] Lagüela S, Martínez J, Armesto J, Arias P. Energy efficiency studies through 3D laser scanning and thermographic technologies. *Energy Build* 2011;43:1216–21. doi:10.1016/j.enbuild.2010.12.031.
- [108] Boarin P. *Edilizia Scolastica. Riquilificazione Energetica e Ambientale. Metodologie operative, requisiti, strategie ed esempi per gli interventi sul patrimonio esistente.* Monfalcone: EdicomEdozioni; 2010.
- [109] Hatamipour MS, Abedi A. Passive cooling systems in buildings: Some useful experiences from ancient architecture for natural cooling in a hot and humid region. *Energy Convers Manag* 2008;49:2317–23. doi:10.1016/j.enconman.2008.01.018.
- [110] Zhai Z (John), Previtali JM. Ancient vernacular architecture: characteristics categorization and energy performance evaluation. *Energy Build* 2010;42:357–65. doi:10.1016/j.enbuild.2009.10.002.
- [111] Sterflinger K, Etenauer J, Piñar G. Bio-susceptibility of Materials and Thermal Insulation Systems used for Historical Buildings. *Energy Procedia* 2013;40:499–506. doi:10.1016/j.egypro.2013.08.057.
- [112] Abuku M, Janssen H, Roels S. Impact of wind-driven rain on historic brick wall buildings in a moderately cold and humid climate: Numerical analyses of mould growth risk, indoor climate and energy consumption. *Energy Build* 2009;41:101–10. doi:10.1016/j.enbuild.2008.07.011.
- [113] ANSI/ASHRAE. *Public Review Draft Energy Guideline for Historical Buildings.* Atlanta, GA, USA: 2015.
- [114] Krarti M. Evaluation of large scale building energy efficiency retrofit program in Kuwait. *Renew Sustain Energy Rev* 2015;50:1069–80. doi:10.1016/j.rser.2015.05.063.

- [115] Tadeu S, Rodrigues C, Tadeu A, Freire F, Simões N. Energy retrofit of historic buildings: Environmental assessment of cost-optimal solutions. *J Build Eng* 2015;4:167–76. doi:10.1016/j.jobbe.2015.09.009.
- [116] Boira JV. L'aigua domesticada. L'arribada de l'aigua potable a València. Valencia: Ajuntament de València; 2007.
- [117] Institute for Veterinary Public Health. WORLD MAPS OF KÖPPEN-GEIGER CLIMATE CLASSIFICATION 2011. <http://koeppen-geiger.vu-wien.ac.at>.
- [118] Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo (INSHT). NTP 501: Ambiente térmico: inconfort térmico local. España: 1998.
- [119] AENOR. UNE-ISO 7726 Ergonomía de los ambientes térmicos. Madrid: 2002.
- [120] P Ole Fanger. Thermal Comfort: Analysis and applications in environmental engineering. McGraw-Hill 1970.
- [121] AENOR. UNE-EN ISO 7730 Ergonomía del Ambiente Térmico. Madrid, Spain: 2006.
- [122] AENOR. UNE-EN 15251 Parámetros del ambiente interior a considerar para el diseño y la evaluación de la eficiencia energética de edificios incluyendo la calidad del aire interior, condiciones térmicas, iluminación y ruido. Madrid: 2008.
- [123] Mayorga MJ, Ruiz V. Muestras utilizados en investigación educativa en España. *Rev Electrónica Investig Y Evaluación Educ* 2002;8.