



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

*Estudio de la transmitancia térmica de la envolvente del
CUD-ENM, cuantificando la limitación de cámaras
termográficas low cost*

Grado en Ingeniería Mecánica

ALUMNO: José Antonio Carlier Sánchez

DIRECTORES: Iván Garrido González
Miguel Ángel Álvarez Feijoo

CURSO ACADÉMICO: 2023-2024

Universida_{de}Vigo



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

*Estudio de la transmitancia térmica de la envolvente del
CUD-ENM, cuantificando la limitación de cámaras
termográficas low cost*

Grado en Ingeniería Mecánica
Intensificación en Tecnología Naval
Infantería de Marina

UniversidadeVigo

RESUMEN

Existen varios métodos para el estudio y análisis de la transmitancia térmica (*U-value*) de la envolvente de los edificios, como son el flujo de medidor de calor y la termografía infrarroja. En este trabajo, se ha estudiado la envolvente del CUD, en la planta baja, tanto en la cara norte en el despacho 103, como en la sur, en el seminario 2. Para ello, se ha utilizado un método basado en el cálculo del *U-value* de las paredes, en el que se emplea termografía infrarroja, usando dos cámaras de distintas gamas.

Las diferencias presentadas entre las dos cámaras FLIR utilizadas se hacen evidentes sobre todo en la calidad de la imagen y en la exactitud de la toma de la temperatura de las zonas estudiadas. Sin embargo, con ambas se llega a la misma conclusión con respecto al estado de la envolvente.

Se ha comprobado el deterioro presentado de dichas fachadas debido al paso de los años, en una ubicación con unas condiciones meteorológicas que inciden negativamente en ellas. Se ha observado que la cara norte se encuentra en peor estado que la cara sur debido sobre todo a su exposición directa a la ría de Pontevedra.

PALABRAS CLAVE

Termografía infrarroja, cámara *low cost*, transmitancia térmica, envolvente, eficiencia energética

AGRADECIMIENTOS

Iba a comenzar este apartado como cualquier otro. Otro apartado que, fruto del agobio de las fechas de entrega y de este último curso, iba a ser escrito de manera rápida sin poderle dar la gran importancia que se merece. Sin embargo, frené esa tónica y lo pensé detenidamente.

En primer lugar, y más importante; mi más profundo agradecimiento a mi familia, esas personas que han estado conmigo desde el principio; que me han apoyado en los malos momentos y han hecho aún más especiales esos otros felices. Especialmente gracias a mi padre por ser mi referente en este nuevo mundo que he descubierto, en el que con la experiencia ha sabido darme consejos muy provechosos. Gracias a mi madre, por enseñarme que todo lo que te propongas se puede conseguir, por ser mi fiel confidente que ha estado pendiente de mí como si estuviera viviendo aún en casa. Han sido, son y seréis las dos personas más importantes en mi vida, que han hecho lo imposible posible para poder ayudarme en lo que fuese tanto en mi periodo en la Escuela Naval como en el tiempo.

Han sido 5 años largos, duros y provechosos; pero sobre todo muy impresionantes. En los que he podido desarrollarme como oficial de la Armada, y sobre todo como persona. Valores que me han ido inculcando durante el transcurso de esta aventura a base de charlas motivadoras y sobre todo de ejemplos. Por haber sido los grandes partícipes de esto, gracias a esos profesores del ámbito militar en los que he podido ver reflejado como un oficial de la Armada debe comportarse tanto profesional como personalmente.

Gracias Pedro, Javier y Manuel por ser quienes me habéis apoyado en los momentos más difíciles y ser mis compañeros de camarera durante tantos años. Gracias a vosotros mi estancia en la ENM ha sido mucho más llevadera, donde hay momentos que, por vosotros, nunca se me olvidarán.

Sin olvidar a mi promoción de infantería de marina, con los que hemos pasado momentos que no se nos olvidarán. A cada uno de vosotros 20 que en algún momento de estos 5 años me habéis echado una mano como buenos amigos que os habéis convertido todos.

Agradecer a los profesores D. Iván Garrido González y D. Miguel Ángel Álvarez Feijoo por apoyarme en todo momento con el trabajo de fin de grado, que a base de trabajo por parte de ambos bandos (profesores y alumno) he conseguido de realizar. Por estar hasta el periodo vacacional pendiente de mis mensajes en todo momento para poder ayudarme en lo que requiriese, por su guía, paciencia y orientación en los momentos de dificultad y estancamiento.

CONTENIDO

Contenido	1
Índice de Figuras	2
Índice de Tablas.....	5
1 Introducción y objetivos	6
1.1 Introducción	6
1.2 Motivación y objetivos.....	8
1.3 Estructura del trabajo	9
2 Estado del arte	10
2.1 Termografía infrarroja como tecnología	10
2.1.1 Modos de trabajo	13
2.2 Aplicación de la termografía infrarroja para el cálculo de la transmitancia térmica.	15
3 Desarrollo del TFG.....	23
3.1 Metodología utilizada	23
3.2 Descripción detallada del material utilizado	26
3.3 Programas comerciales FLIR.....	31
3.4 Programas auxiliares utilizados	33
3.5 Centro Universitario de la Defensa en Marín (Pontevedra).....	37
3.5.1 Casos estudiados.....	39
4 Resultados y discusión	42
4.1 <i>U-value</i> teórica	42
4.2 <i>U-Value</i> obtenidas con la FLIR E85	42
4.3 Comparación <i>U-value</i> teórica con <i>U-value</i> medida con la FLIR E85	52
4.3.1 Causas de la discrepancia	54
4.4 Comparación <i>U-Value</i> teórica y <i>U-Value</i> FLIR E85 con resultados de FLIR OneEdge.....	55
5 Conclusiones y líneas futuras	59
5.1 Conclusiones	59
5.2 Líneas futuras	60
6 Bibliografía.....	61
Anexo I: Implicaciones Sociales, y/o Económicas, y/o Ambientales	66
Anexo II: Reflexiones Éticas y Sociales	68
Anexo III: Código empleado para los programas auxiliares	69

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1 La eficiencia energética en el hogar [2].....	6
Figura 1-2 Participación de las diferentes fuentes de energía (%) en el consumo final de energía en el sector residencial en Europa. Año 2021 [10]	7
Figura 1-3 Esquema tipo funcionamiento de la IRT [23]	9
Figura 2-1 Espectro electromagnético [29].	11
Figura 2-2 Corrección de emisividad de cuerpos grises según su longitud de onda [37].	12
Figura 2-3 Cámara termográfica [19].	13
Figura 2-4 Diagnóstico por termografía infrarroja de una casa de campo [53].	16
Figura 2-5 Termografía que muestra un problema crítico con la conexión en la fase central y en menor medida en la fase inferior. La posible causa podría ser conexiones sueltas. Necesita reparación inmediata. [52]	16
Figura 2-6 Gráfica representativa de las temperaturas exteriores e interiores de la vivienda durante los días de estudio, resaltando el periodo horario estudiado [43].	17
Figura 2-7 De izquierda a derecha, imagen termográfica tomada a las 7 de la mañana y a las 8 de la tarde en el interior de la vivienda [43].	17
Figura 2-8 De izquierda a derecha, imagen termográfica tomada a las 7 de la mañana y a las 8 de la tarde del exterior de la fachada norte de la vivienda [44].	17
Figura 2-9 Porcentaje de desviación absoluta entre los U-value teóricos y medidos para termografía infrarroja (IRT) y termohigrometría (TH) [56].	20
Figura 2-10 Imagen IR de la temperatura de una pared de una sola hoja estudiada en el trabajo con su representación en 2D de los U-value calculados [58].	22
Figura 3-1 Papel de aluminio reflectante en la pared a estudiar [Autoría propia].	25
Figura 3-2 Cámaras FLIR en disposición de medir en el primer caso estudiado [Autoría propia]. ..	27
Figura 3-3 Cámara FLIR E85 [63].	28
Figura 3-4 Cámara FLIR OneEdge acoplada a teléfono móvil [64].	29
Figura 3-5 Sensores iButtons [66].	30
Figura 3-6 Sensor iButton en el exterior del edificio [Autoría propia].	30
Figura 3-7 Termohigrómetro Laserliner ClimaPilot [67].	31
Figura 3-8 Logo de FLIR Tools [68].	32
Figura 3-9 Momento de estudio del caso A [Autoría propia].	32
Figura 3-10 FLIR Ignite para móvil [Autoría propia].	33
Figura 3-11 Exportación de la zona de interés del caso A en formato CSV [Autoría propia].	34
Figura 3-12 Ejecutable desde el Sistema Operativo con ruta del CSV [Autoría propia].	34
Figura 3-13 Correlación de los píxeles [Autoría propia].	34
Figura 3-14 Apertura del segundo ejecutable, e introducción de la ruta asociada a la imagen de referencia del caso de estudio en concreto [Autoría propia].	34

Figura 3-15 a) Apertura de la imagen de referencia, b) selección de la zona de interés (ver en la imagen los trazos blancos), c) y resultado del recorte [Autoría propia].	35
Figura 3-16 Introducción de la ruta en donde se encuentra todas las imágenes de la FLIR OneEdge del caso de estudio en concreto [Autoría propia].	36
Figura 3-17 Introducción de las dimensiones deseadas de cada recorte [Autoría propia].	36
Figura 3-18 Resultado final del segundo ejecutable [Autoría propia].	36
Figura 3-19 Escuela Naval Militar (42° 23' 48,6'' N, 8° 42' 12,6'' W) [69].	37
Figura 3-20 Edificio del CUD rodeando el patio de aulas, marcando los casos de estudios analizados [Autoría propia].	38
Figura 3-21 Zona de interés del caso A (los números indican dimensión en píxeles) [Autoría propia].	40
Figura 3-22 Despacho 103 el 23 de enero de 2024 durante el primer análisis térmico [Autoría propia].	40
Figura 3-23 Área seleccionada caso B (los números indican dimensión en píxeles) [Autoría propia].	41
Figura 3-24 Seminario 2 el 13 de febrero de 2024 durante el tercero análisis térmico [Autoría propia].	41
Figura 4-1 Temperatura interior 23 de enero de 2024 tomada por el sensor iButton en el interior del despacho [Autoría propia].	43
Figura 4-2 Temperatura exterior 23 de enero de 2024 tomada por el sensor iButton en el exterior del despacho [Autoría propia].	43
Figura 4-3 T_{media} del caso A el 23 de enero de 2024 [Autoría propia].	44
Figura 4-4 R_a del tiempo estudiado caso A el 23 de enero [Autoría propia].	45
Figura 4-5 Coeficiente expansión temperatura volumétrica (β) del caso A el 23 de enero [Autoría propia].	45
Figura 4-6 U-value caso A el 23 de enero de 2024 [Autoría propia].	46
Figura 4-7 Temperatura interior 30 de enero de 2024 tomada por el sensor iButton en el interior del despacho [Autoría propia].	46
Figura 4-8 Temperatura exterior 30 de enero de 2024 tomada por el sensor iButton en el exterior del despacho [Autoría propia].	47
Figura 4-9 T_{media} del caso A el 30 de enero de 2024 [Autoría propia].	47
Figura 4-10 R_a del tiempo estudiado caso A el 30 de enero [Autoría propia].	48
Figura 4-11 Coeficiente expansión temperatura volumétrica (β) del caso A el 30 de enero [Autoría propia].	48
Figura 4-12 U-value caso A el 30 de enero de 2024 [Autoría propia].	49
Figura 4-13 Temperatura exterior 13 de febrero de 2024 tomada por el sensor iButton en el exterior del seminario 2 [Autoría propia].	50
Figura 4-14 Temperatura interior 13 de febrero de 2024 tomada por el sensor iButton en el interior del seminario 2 [Autoría propia].	50
Figura 4-15 T_{media} del caso B el 13 de febrero de 2024 [Autoría propia].	51

Figura 4-16 Ra del tiempo estudiado caso B el 13 de febrero [Autoría propia].	51
Figura 4-17 Coeficiente expansión temperatura volumétrica (β) del caso B el 13 de febrero [Autoría propia].	52
Figura 4-18 <i>U-value</i> caso B el 13 de febrero de 2024 [Autoría propia].	52
Figura 4-19 Comparación <i>U-value</i> _{mes} con <i>U-value</i> _{th} en caso A el 23 de enero de 2024 [Autoría propia].	53
Figura 4-20 Comparación <i>U-value</i> _{mes} con <i>U-value</i> _{th} en caso A el 30 de enero de 2024 [Autoría propia].	53
Figura 4-21 Comparación <i>U-value</i> _{mes} con <i>U-value</i> _{th} en caso B el 13 de febrero de 2024 [Autoría propia].	54
Figura 4-22 a) Zona estudiada el día 30 de enero de 2024 mostrada con la FLIR OneEdge. b) Zona estudiada el día 30 de enero de 2024 mostrada con la FLIR E85 [Autoría propia].	55
Figura 4-23 Correlación entre la FLIR OneEdge y la FLIR E85 en el momento inicial del caso 30 de enero [Autoría propia].	56
Figura 4-24 Correlación entre la FLIR OneEdge y la FLIR E85 en el momento final del caso 30 de enero [Autoría propia].	56
Figura 4-25 Comparación Temperaturas medias del día 23 de enero de los primeros 31 minutos, entre la FLIR OneEdge y la FLIR E85 [Autoría propia].	57
Figura 4-26 Comparación de los <i>U-values</i> entre la FLIR OneEdge, la FLIR E85 y la teórica [Autoría propia].	57

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1. Material y características térmicas de las capas de las paredes externas en el caso del primer estudio basado en una casa familiar [18].....	18
Tabla 2-2 U-value calculadas con los distintos métodos en la fachada norte del primer caso de estudio desde una segunda quincena de diciembre a finales del enero siguiente [17].....	19
Tabla 2-3 U-value de los diferentes elementos de las construcciones estudiadas en distintas zonas. Siendo zona 1: zona de costa; zona 2: zona de interior; zona 3: zona entre montañas [56].	20
Tabla 2-4 Características térmicas y desviación absoluta porcentual entre el U-value calculado y medido [57].	21
Tabla 3-1 Características de la cámara FLIR E85 [63].	28
Tabla 3-2 Especificaciones FLIR OneEdge [65].	29
Tabla 3-3 Primeros 10 minutos medidos por el sensor iButton en el exterior en el primer caso [Autoría propia].....	31
Tabla 3-4 Materiales de la fachada despacho 103 establecidos por capas [Autoría propia].	38
Tabla 3-5 Materiales de la fachada seminario 2 establecidos por capas [Autoría propia].	38
Tabla 3-6 Características área de la pared seleccionada [Autoría propia].	39
Tabla 3-7 Características área de la pared seleccionada [Autoría propia].	41
Tabla 4-1 Cálculo de resistencias térmicas de las capas del despacho 103 [Autoría propia].	42

1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1 Introducción

Actualmente se vive en un momento donde cobra gran importancia los desafíos medioambientales y energéticos relacionados estrechamente con los desafíos económicos. Con la escasez de los combustibles fósiles y las nuevas políticas enfocadas en el cuidado del planeta, juega un papel clave el concepto de la eficiencia energética [1].

El objetivo de la eficiencia energética consiste en conseguir el rendimiento máximo de la tarea a realizar con el menor consumo posible de los recursos existentes. Por lo tanto, este ratio es un factor esencial para enfrentarse a desafíos como la sostenibilidad, el cambio climático y la seguridad energética, entre otros. Con el paso de los años, este está adquiriendo mayor protagonismo, de tal manera que hay leyes que respaldan y regulan estándares y objetivos para conseguir sistemas más eficientes en términos energéticos. Para cumplirlos, las auditorías energéticas se posicionan como una herramienta esencial con el fin de evaluar y optimizar el consumo de energía en diversos sectores [2][3], siendo la etiqueta A la de menor consumo (Figura 1-1).



Figura 1-1 La eficiencia energética en el hogar [2]

Las auditorías energéticas en el sector de edificación permiten hacer frente a los cambios a largo plazo de las temperaturas y los patrones climáticos relacionados con el cambio climático. Un aumento anómalo de las temperaturas en verano, o bajada anómala en invierno, conlleva un mayor consumo de

energía por parte de los climatizadores del interior de un edificio para mantenerlo en condiciones de confort térmico en caso de una mala eficiencia energética, subiendo así los costes económicos, más refrigeración o más calefacción, respectivamente [4]. Asimismo, variaciones bruscas de temperatura en interiores de edificios, provocadas por una envolvente en condiciones térmicamente no óptimas, puede ocasionar generación de humedad en paredes y su posterior agrietamiento. Por otra parte, el cambio climático no afecta únicamente a la temperatura, sino que también a las precipitaciones, ocasionando sequías y lluvias torrenciales que pueden alterar la base de las infraestructuras a causa de deslizamientos de tierra o inundaciones, ocasionándoles a menudo daños irreparables. Así, se puede afirmar que dicho cambio tiene un vínculo intrínseco con el deterioro de los edificios, aparte del energético, que ha ido acentuándose a lo largo de los años [5][6].

En España, el sector de la edificación tiene un consumo de energía considerable con respecto a los otros sectores. Según datos del Instituto Nacional de Estadística (INE) y del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico [7], en 2021, el consumo final de la energía en el sector comercial y residencial fue de alrededor de un 40% del total del país [8][9]. En la Figura 1-2 se muestra las fuentes energéticas empleadas en el consumo final de energía en el sector residencial en Europa en el año 2021, representando aún un porcentaje elevado los combustibles fósiles (Figura 1-2).

Regiones	Combustibles fósiles sólidos (%)	Gas natural (%)	Petróleo y derivados (%)	Energía renovable y biofueles (%)	Electricidad (%)	Calor (%)
EU	2,61	33,51	9,53	21,24	24,55	8,63
Bélgica	0,46	41,9	28,48	9,7	19,29	0,17
Bulgaria	5,76	4,72	0,88	31,76	42,78	14,1
Chequia	8,09	26,47	0,61	32,09	18,87	13,87
Dinamarca	0	12,82	3,49	24,24	20,61	38,83
Alemania	0,59	42,76	13,45	15,53	20,26	7,42
Estonia	0,08	6,25	0,49	40,19	19,86	33,16
Irlanda	10,84	19,39	42,29	2,79	24,72	0
Grecia	0,08	11,67	26,67	25,13	35,61	0,84
España	0,26	24,65	16,71	15,71	42,66	0
Francia	0,06	28	9,85	24,03	34,58	3,47
Croacia	0,07	21,46	3,65	46,56	23,22	5,03
Italia	0	52,57	5,86	21,34	18	2,22
Chipre	0	0	28,28	27,71	44	0
Letonia	0,1	9,59	4,41	38,47	12,84	34,59
Lituania	2,66	13,49	3,21	31,95	17,99	30,75
Luxemburgo	0,07	50,12	27,94	5,05	16,82	0
Hungría	0,7	51,84	1,15	21,06	17,44	7,8

Figura 1-2 Participación de las diferentes fuentes de energía (%) en el consumo final de energía en el sector residencial en Europa. Año 2021 [10]

De este modo, los edificios pueden adquirir un papel crucial en la lucha contra el cambio climático mediante el uso de materiales sostenibles, y de sistemas de energía renovable. Incluso en las Fuerzas Armadas, en donde medidas de protección de edificios se están llevando a cabo tradicionalmente, siendo una labor importante para la difusión de la cultura de Defensa el acceso de los ciudadanos a su patrimonio cultural [10].

Consecuentemente de todo lo comentado hasta ahora, las auditorías energéticas se estipulan como un instrumento detallado capaz de proporcionar una visión del perfil de consumo energético de las edificaciones relacionado con las acciones a tomar para reducirlo. Analizando ese perfil, varios autores han establecido que las paredes exteriores de un edificio, es decir, la envolvente, son las estructuras que más deterioro y pérdidas energéticas tienen con diferencia, con respecto a otros elementos de un edificio como las ventanas o las paredes interiores [11][13][14][15]. De ahí que las auditorías energéticas utilicen cámaras termográficas para adquirir imágenes térmicas, que representan patrones de temperatura, para su posterior compresión acerca de la prestación térmica de la envolvente de un edificio. Concretamente, para la estimación de la transmitancia térmica, también conocido como *U-value* ($W/(m^2 \cdot K)$), es un parámetro clave para la evaluación de la calidad de un edificio [15].

El *U-value* es un término relacionado con la eficiencia energética y la transferencia de calor, representando la cantidad de calor que se transmite a través de los elementos constructivos, entre ellos, de las envolventes de edificios. Además de esto, este está intrínsecamente relacionado con la geometría y la calidad de instalación de los materiales constructivos utilizados. El *U-value* se utiliza para optimizar térmicamente los diseños de los edificios [15], conservar y proteger el patrimonio cultural de las ciudades o evaluar el confort térmico en los interiores de los edificios, entre otras utilidades. Un *U-value* más bajo, junto con un buen diseño del edificio, mejora la eficiencia energética de los edificios.

1.2 Motivación y objetivos

El uso de medidores de flujo de calor (conocidos en inglés como *Heat Flux Meter*, HFM) [16] es un método utilizado para monitorizar la velocidad del flujo de calor a través de un material o superficie con el fin de conseguir una evaluación térmica, teniendo en consideración las temperaturas interiores y exteriores de las estructuras.

El método HFM se basa en algunas hipótesis simplificadas. En particular, solo se consideran elementos planos y homogéneos, flujo de calor unidireccional y transmisión de calor debido únicamente a fenómenos conductivos. La convección (debida a la temperatura y velocidad del aire) y la irradiación (debida a la temperatura de las superficies posicionadas cerca y alrededor del elemento) pueden considerarse simplemente juntas mediante lo que se llama “temperatura del entorno”, que debe medirse adecuadamente [17].

De ahí, se obtiene el parámetro *U-value* según la ISO 9869-1:2014 [18]. Como todo método, o herramienta, el HFM presenta una serie de limitaciones o características que deben de mitigarse. La principal desventaja es que se centra en la medición de un punto en concreto de la pared, siendo esto un aspecto negativo en la medición de elementos de construcción no homogéneos dando unos resultados no precisos. Otro aspecto a destacar de esta herramienta, es el tiempo empleado en la duración de la evaluación, siendo el intervalo de 3 días a 7 días máxime [16].

En este contexto, la termografía infrarroja (conocido en inglés como *Infrared Thermography*, IRT se postula como una alternativa capaz de suplir estas carencias explicadas anteriormente del método HFM, para las mediciones in situ de los *U-value*. La IRT es una técnica no destructiva que es utilizada en el estudio y medición de la distribución de la energía térmica radiante en forma de calor que es emitida por la superficie de un objeto [19]. Generalmente, este método es utilizado para la localización de irregularidades térmicas en las superficies de paredes u otros elementos de construcción de edificios siguiendo las pautas marcadas en la norma EN 13187:1998 [20] y en la Guía Provisional de RESNET para Inspecciones Termográficas de Edificios [21]. En la Figura 1-3 muestra un esquema tipo del funcionamiento de la IRT, detallado en el siguiente apartado.

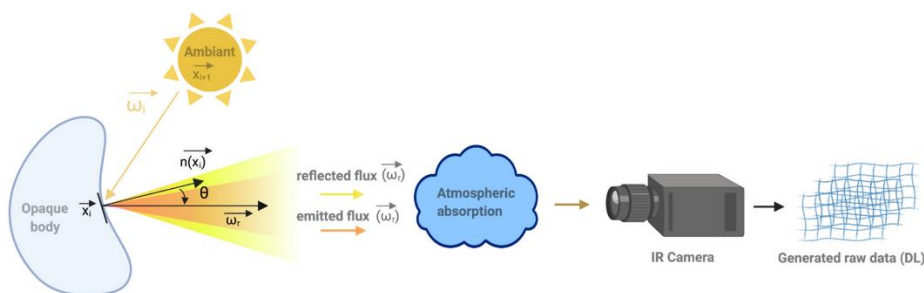


Figura 1-3 Esquema tipo funcionamiento de la IRT [23]

La principal diferencia entre el HFM y el IRT radica en el radio de medición sobre la superficie, ya que como se ha explicado anteriormente, el primero se centra en la evaluación de un punto en específico de la superficie a medir; y el segundo permite una supervisión más amplia y rápida de las variaciones de temperatura del total de la superficie. Asimismo, la evaluación con la IRT dura entre 2 y 3 horas [22].

Teniendo en cuenta los aspectos mencionados anteriormente, este Trabajo Fin de Grado (TFG) parte de un método reconocido y aceptado internacionalmente de IRT desarrollado por la autora Blanca Tejedor [23], para experimentalmente estimar el *U-value*, pero en condiciones no tan estrictas como las recomendadas en las referencia UNE-EN ISO 6946:2012 [24] y ISO 9869-1:2014 [18], para así una mayor practicabilidad. Suponiendo un flujo de calor unidimensional y horizontal a través de la envolvente del edificio del Centro Universitario de la Defensa de la Escuela Naval Militar (CUD-ENM), bajo condiciones de estado estacionario, se aplicará este método de IRT para paredes multicapas; siendo además más preciso que el método HFM, aparte de un menor tiempo de ejecución [22]. Además, se emplea dos cámaras térmicas, una de gama alta y otra de bajo coste (*low cost*), para cuantificar la limitación de la cámara de menor precio frente a la otra. Por último, se compara analíticamente los *U-values* medidos con ambas cámaras frente al teórico de las fachadas seleccionadas del CUD-ENM.

1.3 Estructura del trabajo

El TFG continúa explicando la teoría de la termografía infrarroja, y con el estado del arte donde en primer lugar se exponen varios trabajos acerca de la termografía infrarroja y más adelante, más específicamente, de aquellos que estudian más a fondo el uso de ésta como herramienta de medida de la transmitancia térmica de edificios.

Se continúa con el desarrollo en donde queda reflejado la metodología utilizada en el presente TFG así como también el método de referencia con los distintos pasos que tiene. Se especifica detalladamente el material y los programas utilizado, haciendo hincapié en las cámaras termográficas, los sensores iButtons que tomaban las temperaturas exteriores e interiores de las aulas estudiadas y el termohigrómetro. Se exponen los casos de estudio del edificio del Centro Universitario de la Defensa de Marín, con una breve historia de la infraestructura así como también de los componentes de su envolvente.

A continuación del desarrollo se exponen los resultados obtenidos tras el estudio realizado con ambas cámaras comparando el *U-value* obtenido con el *U-value* teórico que debería de tener cada fachada en cada caso. Por último consta de una serie de conclusiones y líneas futuras, un anexo de implicaciones sociales, económicas y medioambientales; y uno último acerca de las reflexiones éticas y sociales que se han extraído durante el desarrollo de este TFG.

2 ESTADO DEL ARTE

2.1 Termografía infrarroja como tecnología

La termografía infrarroja es una técnica que mediante la generación de una imagen infrarroja sirve como ayuda para la detección de puntos calientes, y fríos, o fuentes de calor inusuales en el área enfocada. Gracias a ésta, se puede visualizar las características térmicas de los objetos mediante ondas transmitidas por éstos y pertenecientes al rango espectral infrarrojo. Para la medición correcta de la temperatura a partir de los valores de radiación térmica obtenidos por el sensor térmico de una cámara infrarroja, conocido como valor absoluto, es necesario tener en cuenta la emisividad (ϵ), definiéndose ésta como la capacidad que tiene un cuerpo de emitir energía infrarroja frente a la recibida, dependiendo en gran parte del material que le constituye, ya que cada uno tiene unas características de emisividad particulares, representando un valor entre 0 y 1 [25]. Además, se tiene que obtener también la información de los siguientes parámetros: humedad relativa y temperatura atmosférica (RH_{atm} y T_{atm}), distancia entre el objeto a estudiar y la cámara infrarroja utilizada (d), y temperatura reflejada del entorno (T_{refl}) [28][29]. Todo ello es justificado por las ecuaciones indicadas a continuación.

Según la ecuación de Planck-Einstein, la radiación es una colección de partículas discretas a las que se denominan ‘fotones’, o ‘cuantos’, teniendo cada una de ellas una energía determinada (Ecuación 1).

$$e = h \cdot \nu = (h \cdot c)/\Lambda \quad (\text{Ecuación 1})$$

Esta ecuación 1 relaciona la energía de estos fotones con sus propiedades ondulatorias, siendo dicha energía directamente proporcional a su frecuencia. En ella: e es la energía del fotón (J), $h = 6,626 \cdot 10^{-34}$ (J·s) es la constante de Planck, c es la velocidad de la luz en el vacío (m/s) y Λ es la longitud de onda del fotón (m).

El espectro electromagnético es el conjunto continuo e infinito de ondas de luz ordenadas en zonas en función de su longitud de onda, y, en consecuencia, de la energía que transportan; dividiéndose en varios intervalos conocidos como bandas espectrales, encontrándose los distintos valores de frecuencia y longitud de onda (Figura 2-1) [28].

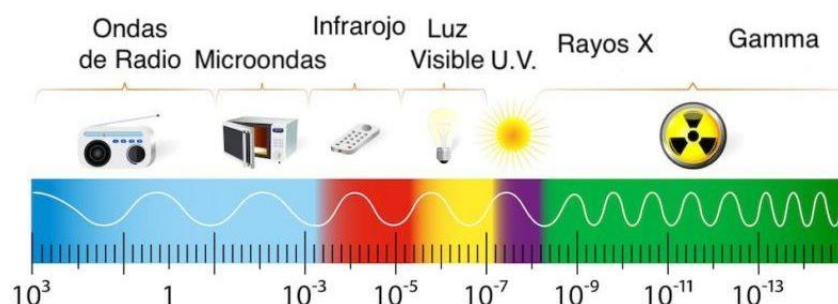


Figura 2-1 Espectro electromagnético [29].

El ojo humano sólo es capaz de detectar las ondas visibles del espectro electromagnético (0.39- 0.77 μm) siendo éste el resultado indirecto de la radiación proporcionada por la radiación solar o por luz artificial. El ojo no es capaz de detectar la radiación infrarroja (IR) que normalmente se encuentra con una longitud de onda entre 2- 15 μm localizándose entre la luz visible y las ondas microondas.

Centrándose en estas bandas espectrales, se encuentra que el rango 0,4 a 1000 μm , perteneciente a la banda infrarroja, se divide a su vez en cuatro sub-bandas: infrarrojo cercano (*near infrared* (NIR), 0,4–1 μm), infrarrojo de onda corta (*short-wave infrared* (SWIR), 1–3 μm), infrarrojo de longitud de onda media (*medium-wave infrared* (MWIR), 3–5 μm) e infrarrojo térmico (*thermal infrared* (TIR), 7–14 μm) [30]. El rango de 5 a 7 μm se conoce como ‘ventana atmosférica’, donde la radiación infrarroja no se transmite de forma eficiente. A mayores, la técnica de termografía infrarroja en condiciones ambientales mide exclusivamente la radiación que es emitida en la banda TIR, ya que es banda óptima para la conversión de la radiación electromagnética a valores de temperatura [31][32].

Por otro lado, la emisión de radiación térmica de un cuerpo, o radiación emitida dentro de la banda infrarroja, se encuentra intrínsecamente vinculada con el estado térmico de éste, en otras palabras; con su temperatura y condiciones superficiales. La temperatura se origina a partir de la radiación térmica que el objeto recibe junto con los procesos internos que ocurren en él, provocando el movimiento de sus átomos y moléculas con una vibración más alta o baja, lo que da un valor más alto o más bajo de su temperatura. Por lo tanto, la velocidad media de éstos es una medida de la temperatura de un cuerpo [32], [33]. Para expresar la radiación térmica emitida por un objeto, matemáticamente se usa la ley de Stefan–Boltzmann (Ecuación 2):

$$E_b = \sigma \cdot T_b^4 \quad (\text{Ecuación 2})$$

Siendo E_b la radiación térmica emitida total por un cuerpo negro por unidad de área (W/m^2), la constante de Stefan-Boltzmann representada con la letra σ , corresponde a un valor igual a $5,67 \cdot 10^{-8}$ ($\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$) y T_b corresponde a la temperatura absoluta de la superficie del cuerpo negro estudiado (K).

Un cuerpo negro es un objeto o cuerpo ideal que absorbe la totalidad de la radiación incidente, independientemente del ángulo de incidencia o la frecuencia. Además, emite toda la radiación térmica recibida en concordancia con el estado térmico o con el valor de la temperatura. Sin embargo, al no existir los cuerpos ideales, se toma un objeto a analizar sometido a radiación denominado ‘simuladores de cuerpo negro’ [34]. En consecuencia, se deduce que los cuerpos reales no lograrán nunca la emisión de toda la radiación térmica recibida en relación con sus temperaturas, denominado estos cuerpos como cuerpos grises. Así pues, la emisividad (ϵ) se estipula como un parámetro que indica la proporción o relación existente entre la radiación térmica emitida por un cuerpo real y la de un cuerpo negro a esa misma temperatura [35]. Entonces, adaptando la ley de Stefan–Boltzmann a cuerpos reales, se introduce la emisividad como parámetro (Ecuación 3).

$$E_g = \epsilon \cdot \sigma \cdot T_g^4 \quad (\text{Ecuación 3})$$

donde los valores de la emisividad se encuentran entre 0,1 y 0,99, siendo E_g y T_g la radiación térmica emitida por un cuerpo gris y su temperatura, respectivamente [36]. En la Figura 2-2 se muestra una gráfica sobre la corrección de emisividad de los cuerpos grises según su longitud de onda.

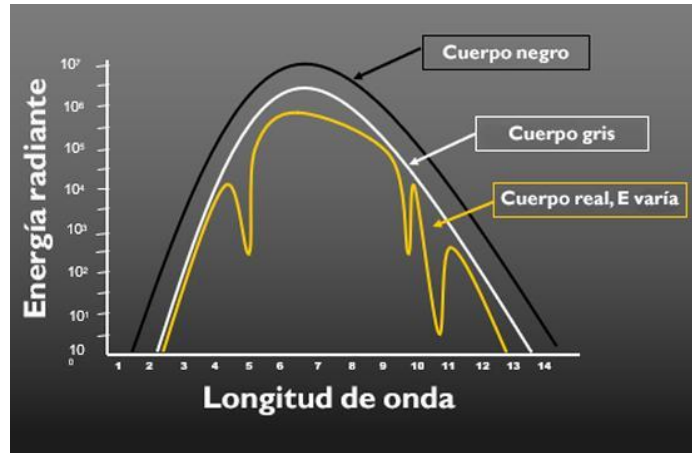


Figura 2-2 Corrección de emisividad de cuerpos grises según su longitud de onda [37].

La radiación térmica restante que llega al sensor térmico de una cámara infrarroja, y que no fue generada por un cuerpo gris en consecuencia a su estado térmico y, por lo tanto, sin afectar al valor de su temperatura, se origina en dos fuentes distintas: radiaciones térmicas reflejadas y transmitidas. La primera de ellas se refiere a la porción de la radiación térmica que el cuerpo gris recibe y es redirigida después de golpear en su superficie. La segunda es la radiación térmica que atraviesa el cuerpo gris sin ninguna alteración en la temperatura del objeto [37].

Entonces, la radiación registrada por una cámara térmica consiste en la combinación de dos componentes principales: la radiación térmica liberada por el objeto bajo estudio, la cual está directamente relacionada con su temperatura, y la radiación térmica reflejada proveniente de la emisión de radiación térmica del entorno [36].

Al realizarse los estudios de termografía infrarroja en materiales opacos, se puede llegar a considerar insignificante la radiación térmica transmitida. Además, durante la medición, en las radiaciones térmicas reflejadas y emitidas hacia la cámara se produce la atenuación atmosférica. Por tanto, la ecuación 4 representa la radiación térmica total medida por la cámara infrarroja (W_{tot} (W/m^2)) (Ecuación 4), destacando que cámara infrarroja, térmica o termográfica se refiere al mismo concepto [38]:

$$W_{tot} = \varepsilon \cdot T \cdot W_{obj} + (1 - \varepsilon) \cdot T \cdot W_{refl} + (1 - T) \cdot W_{atm} \quad (\text{Ecuación 4})$$

siendo ε el valor de la emisividad del objeto, T (-) la transmitancia atmosférica que se obtiene generalmente de forma indirecta al conocer previamente las variables RH_{atm} (humedad relativa atmosférica) (%), T_{atm} (temperatura ambiental atmosférica) (K) y d (distancia entre cámara y objeto) (m) dentro de la cámara.

Es importante señalar que W_{obj} (W/m^2) se refiere a la radiación térmica emitida por el cuerpo, actuando como un cuerpo negro a la misma temperatura; W_{refl} (W/m^2) no sólo depende de la radiancia térmica emitida por el entorno hacia el cuerpo, sino también de las propiedades reflectivas de la superficie del cuerpo. Por esta razón, W_{refl} no es igual a W_{obj} , y la corrección se realiza mediante la determinación de la temperatura reflejada ($W_{refl} = \sigma \cdot T_{refl}^4$, T_{refl} en K). Además, T es aplicado a la radiación térmica del entorno (W_{atm}) (W/m^2) [39].

Si el valor de emisividad no se calcula durante el uso de la cámara de infrarrojos, el valor de temperatura medido se conoce como “temperatura aparente”. En enfoques cualitativos y utilizando el mismo material, o materiales con valores de emisividad similares, los estudios de termografía infrarroja pueden emplear “temperaturas aparentes”. De lo contrario, existen tablas con valores de emisividad de diferentes materiales a diferentes temperaturas y según su estado superficial (pulido, granulado,

oxidado). Sin embargo, siempre se recomiendan pruebas de emisividad in situ cuando se requiere una alta precisión de los valores de temperatura medidos, por ejemplo, en enfoques cuantitativos [40], [41], [42]. Dicha prueba consiste en colocar un material pulido negro encima de la superficie del objeto de interés, dándole un valor 0,98 de emisividad a la cámara. Al estar en equilibrio térmico, se anota el valor de temperatura del material de referencia arrojado por la cámara, y al quitarlo, se ajusta el valor de emisividad de la cámara que sigue enfocando al objeto de interés hasta que el valor de temperatura sea el mismo con respecto al anotado previamente.

En cuanto a T_{refl} , se coloca papel de aluminio frotado paralelo a la superficie del objeto en estudio, y la medición se realiza estableciendo 1 como el valor de emisividad para la medición en la configuración de la cámara de infrarrojos, según lo descrito en la norma [36]. Dado que el aluminio tiene una baja emisividad, el valor de temperatura medido es la temperatura reflejada vinculada a los objetos en el entorno del objeto en estudio y a sus propiedades reflectivas [39]. Como consecuencia, la radiación térmica medida del entorno y las propiedades reflectivas del cuerpo se pueden calcular mediante la Ecuación (2), obteniendo W_{refl} .

Destacar que, en casos prácticos, se recomienda que la lente de la cámara de infrarrojos no esté enfocada directamente en el objeto de manera perpendicular para evitar la medición de la auto-reflexión de la lente en la superficie en estudio [40]. En la Figura 2-3 se muestra una cámara térmica comercial de gama media.

En cuanto a la atenuación atmosférica de la radiación térmica medida por el sensor térmico de una cámara de infrarrojos (Figura 2-3), un “coeficiente de atenuación” introduce tanto la transmitancia atmosférica T como la radiación térmica absorbida por la atmósfera W_{atm} . Generalmente, este parámetro se calcula utilizando dos enfoques diferentes: (i) directo: el operador calcula el “coeficiente de atenuación” a partir de la temperatura atmosférica y la humedad relativa; (ii) indirecto: introduciendo los valores de T_{atm} , RH_{atm} y d en la cámara de infrarrojos [43], [44].



Figura 2-3 Cámara termográfica [19].

2.1.1 Modos de trabajo

Dependiendo del tipo de prueba de termografía infrarroja (IRT) que se va a realizar, existen cuatro combinaciones diferentes, enfocándose estos en la presencia o ausencia de un mecanismo externo y artificial de excitación térmica y en el propósito de la investigación.

Primeramente, haciendo hincapié en la presencia o ausencia de un mecanismo externo y artificial de excitación térmica en el objeto que se encuentra en estudio, existen enfoques activos y pasivos. En el caso de que haya una fuente natural de excitación térmica, como la radiación solar, el enfoque se conoce como “IRT pasiva”. Con la IRT pasiva, se analiza el comportamiento térmico natural del cuerpo estudiado, ya que la medición se realiza en condiciones reales sin ninguna fuente de calor artificial. Sin embargo, en el análisis IRT existe la posibilidad de utilizar fuentes artificiales de calor, con el objetivo

de medir los procesos de calentamiento o enfriamiento del objeto en estudio, durante o después de la excitación térmica [43][44]. Este enfoque se llama “IRT activa”, y las diferentes estimulaciones térmicas se pueden clasificar de la siguiente manera:

- **Técnicas tradicionales de excitación térmica:** mantas térmicas y pistolas de calor. Aunque todavía se utilizan hoy en día, se han desarrollado nuevas técnicas de excitación térmica para mejorar la tasa de detección de defectos [47].
- **Nuevas técnicas de excitación térmica:** técnicas de estimulación óptica. Pueden emitir tanto pulsos de energía, como calor continuo y modulado, a la estructura en estudio mediante lámparas de destello y lámparas halógenas, respectivamente. Sin embargo, estas nuevas técnicas no proporcionan suficiente contraste térmico en algunos defectos específicos de materiales, como algunos insertos en polímeros reforzados con fibra de carbono (CFRP). Por lo tanto, se han utilizado técnicas avanzadas de excitación térmica para superar las limitaciones de las técnicas de estimulación óptica [47].
- **Técnicas avanzadas de excitación térmica:** existen varios métodos avanzados, como la vibrotermografía, la termografía por termoinducción, la termografía de punto láser y la termografía excitada por ultrasonidos. En la vibrotermografía, la estimulación térmica se induce mediante el efecto de la excitación mecánica aplicada externamente al material, identificando con una cámara de infrarrojos posibles defectos a través del calor generado por la fricción. Por otro lado, en la termografía por termoinducción, la excitación térmica es la circulación de una corriente a ciertas frecuencias a lo largo de una bobina de inducción, generando corrientes de Foucault dentro del material a inspeccionar [47]. Dado que la densidad de las corrientes de Foucault es diferente en los defectos, el calor producido por el efecto Joule será diferente en áreas con defectos y se puede identificar con una cámara de infrarrojos. En cuanto a la termografía de punto láser, es un método novedoso para la prueba e imagen de grietas en la superficie, con ventajas como ser desplegable de forma remota, ajustar explícitamente la posición del enfoque y ser adecuado para la detección de grietas en la superficie, ya que el flujo de calor se propaga principalmente cerca de la superficie. Finalmente, la termografía excitada por ultrasonidos es una de las variantes de la vibrotermografía, siendo un método de contacto en este caso. La excitación térmica consiste en un sonotrodo que está en contacto físico con la pieza a ensayar para excitar el material con excitación ultrasónica, generando vibraciones tridimensionales que viajan a través del material y, por lo tanto, generan calor que se mide con una cámara de infrarrojos [48] [49].

Además, la IRT activa presenta las siguientes subclasificaciones:

- **Según las posiciones relativas entre el objeto, la fuente de calor y la cámara de infrarrojos:** Modos de Reflexión y Transmisión. En el modo de reflexión, la fuente de calor y la cámara de infrarrojos están en el mismo lado con respecto a la muestra en estudio,. De lo contrario, si el cuerpo se encuentra entre la fuente de calor y la cámara de infrarrojos, el método corresponde al modo de transmisión [50].
- **Según el tipo de proceso de calentamiento:** Termografía por Paso (*step thermography*, ST), Termografía Pulsada (*pulsed thermography*, PT) y Termografía Modulada (*lock-in thermography*, LT). La ST consiste en aplicar cierto calor constante al objeto, y luego dejarlo enfriar. La PT se basa en la estimulación térmica del objeto en estudio en pulsos cortos, con una duración de milisegundos. Sin embargo, en LT, el flujo de calor aplicado se modula a una frecuencia dada [51].

Por otro lado, en cuanto al propósito de la investigación, la técnica termográfica se puede aplicar cualitativa o cuantitativamente. Existen casos donde no se necesita un conocimiento preciso de los valores de temperatura en las imágenes térmicas, y el objetivo es centrarse en la distribución de temperatura o los valores relativos de los píxeles, y se aplica la “IRT cualitativa”. Se utiliza para todas las aplicaciones de IRT en las que el objetivo principal es detectar la existencia de variaciones de temperatura [39], [51].

2.2 Aplicación de la termografía infrarroja para el cálculo de la transmitancia térmica.

Durante una auditoría energética de un edificio, la termografía infrarroja se puede utilizar para inspeccionar rápidamente todo el edificio y detectar pérdidas o ganancias de calor a través de la envolvente, y para respaldar propuestas utilizando las imágenes infrarrojas como prueba de un problema o para respaldar otros datos e información recopilados durante una auditoría. La información precisa y detallada sobre dónde ocurre un problema puede revelar la fuente de éste, evitando así trabajos de renovación extensos que puedan aumentar el costo. En su lugar, es posible utilizar la información proporcionada por la inspección de IRT para realizar reparaciones locales de bajo costo. Algunos ejemplos incluyen la ubicación de falta de aislamiento, instalado incorrectamente o dañado, puentes térmicos, fugas de aire costosas en encuentros de distintos cerramientos, daños por humedad y detección de grietas en estructuras de concreto [52].

Al utilizar la termografía infrarroja para inspeccionar la envolvente de un edificio, es necesario tener en cuenta los fenómenos físicos que ocurren y cómo interactúa el entorno exterior con el interior [52]. Durante el día, la radiación solar incidente en las superficies externas del edificio se absorbe y aumenta su temperatura superficial. Como resultado de la diferencia de temperatura entre la superficie de la pared externa e interna, el calor se conduce a través de la pared [52].

Otro parámetro que influirá en los fenómenos es el viento, ya que las pérdidas de calor convectivas dependen de la velocidad del viento. Durante la noche, el calor se disipa desde la superficie externa de la pared hacia el ambiente de temperatura más baja por radiación y convección. Dependiendo del elemento del edificio bajo investigación (por ejemplo, pared, fachada acristalada, techo), es posible observar diferentes fenómenos [52]. Por ejemplo, durante el invierno, la superficie externa de una pared o una sección de una pared sin aislamiento tendrá una temperatura superficial más alta. Sin embargo, para evitar el aumento de temperatura como resultado de la radiación solar incidente, las mediciones de IR deben realizarse de noche o durante un día nublado, con velocidades de viento bajas para minimizar las pérdidas de calor convectivas. Alternativamente, se pueden realizar mediciones similares en paredes interiores, minimizando así el impacto de las condiciones exteriores adversas. Sin embargo, hay que tener en cuenta que el impacto de la energía solar absorbida continúa durante algunas horas [39].

Otro problema común que se puede identificar con una inspección de IR es el daño por humedad. Una masa húmeda retiene el calor absorbido durante un período más largo que una masa seca y, por lo tanto, tarda más en irradiar este calor. Esta es la manera de identificar problemas de humedad en paredes o techos que son más comunes [38].

El aislamiento térmico reduce las pérdidas de calor por conducción a través de la envolvente del edificio (es decir, paredes, techo) durante el invierno y las ganancias de calor durante el verano. Como resultado (Figura 2-4), reduce los costos de energía para calefacción o refrigeración y mejora las condiciones de confort térmico en interiores al aumentar la temperatura de la superficie interior de la pared en invierno y al reducirla en verano. Las superficies frías y calientes tienen un impacto negativo directo en el confort térmico humano y, a pesar de que la temperatura del aire esté en niveles apropiados, puede causar incomodidad térmica [52].

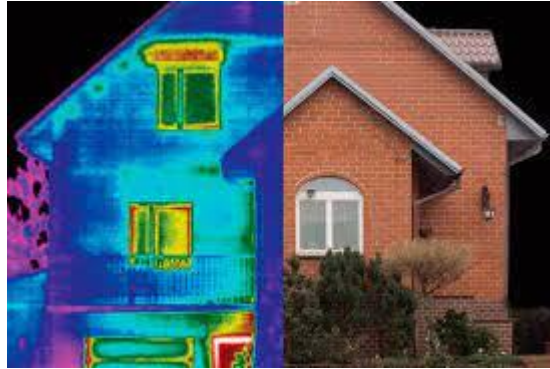


Figura 2-4 Diagnóstico por termografía infrarroja de una casa de campo [53].

Las principales áreas para el uso de la termografía infrarroja en el diagnóstico de edificios son presentadas en detalle por Balaras et Argiriou [52]. En particular, se exponen ejemplos representativos de inspección de envolventes de edificios, sistemas mecánicos y eléctricos (Figura 2-5); en edificios de oficinas para demostrar problemas comunes e interpretación de datos. En este estudio, se sugiere que el uso de la termografía infrarroja hacia los elementos externos de los edificios se realice ya sea por la noche o durante un día nublado. Se pudo concluir que esto es un aspecto clave para evitar el problema del aumento de temperatura ocurrido debido a la radiación solar incidente y el impacto de la energía solar absorbida, presentando un leve retraso de varias horas. Además, en este trabajo se señala que las mediciones deben realizarse con baja velocidad del viento para minimizar en la medida de lo posible la influencia de las pérdidas de calor convectivo [52].

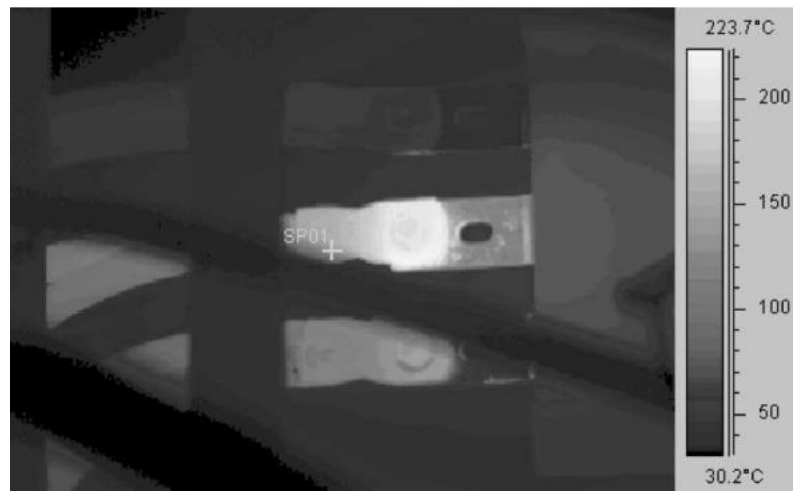


Figura 2-5 Termografía que muestra un problema crítico con la conexión en la fase central y en menor medida en la fase inferior. La posible causa podría ser conexiones sueltas. Necesita reparación inmediata. [52]

Hay autores, como Ganem Karlen, que realizaron un estudio enfocándose en la utilidad de la termografía infrarroja usada como herramienta de diagnóstico con el fin de examinar de una forma rápida el desempeño térmico de los edificios que existen en la zona estudiada. Para ello se centró en viviendas de la ciudad de Mendoza, concretamente en una vivienda de dos plantas construida en el año 1960, cuya fachada principal se encuentra orientada hacia el Ecuador (hacia el norte ya que se encuentra en el hemisferio sur) [43].

Se tomaron las mediciones durante el día 3 y 4 de febrero de 2018, año del estudio, debido a que eran los días cuyas características más se aproximaban a un día promedio de la estación y, además, durante los días previos hubo condiciones meteorológicas muy similares proporcionando así una estabilidad al comportamiento térmico de la vivienda. Las imágenes termográficas fueron tomadas en un periodo comprendido entre las 7 de la mañana, justo antes del amanecer; y las 8 de la tarde, hora posterior al ocaso (véase Figura 2-6) [43].

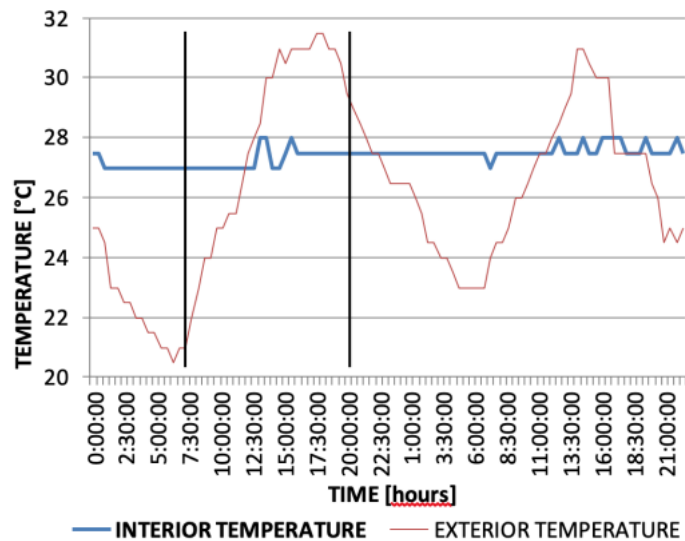


Figura 2-6 Gráfica representativa de las temperaturas exteriores e interiores de la vivienda durante los días de estudio, resaltando el periodo horario estudiado [43].

Las imágenes tomadas (Figura 2-7 y Figura 2-8) se compararon con la gráfica de las temperaturas medidas tanto del interior como del exterior de la vivienda, pudiendo estudiar el aislamiento térmico de la vivienda pudiendo comprobar una variación de 5°C y 6°C, evaluando como es la distribución del calor en la construcción, localizando puentes térmicos u otro tipo de zonas que presentan intercambio energético. A mayores se pudo cuantificar la acumulación del calor durante el día en la vivienda valorando el enfriamiento de ésta durante la noche [43].

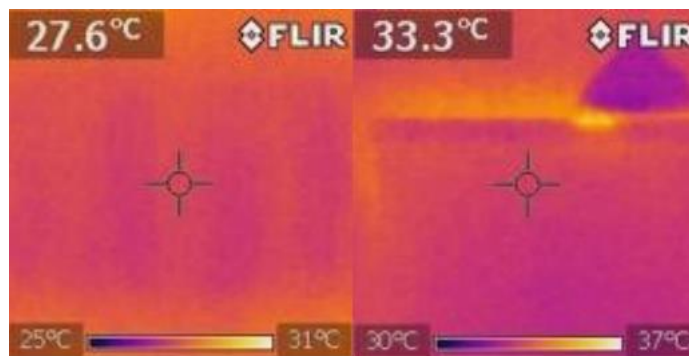


Figura 2-7 De izquierda a derecha, imagen termográfica tomada a las 7 de la mañana y a las 8 de la tarde en el interior de la vivienda [43].

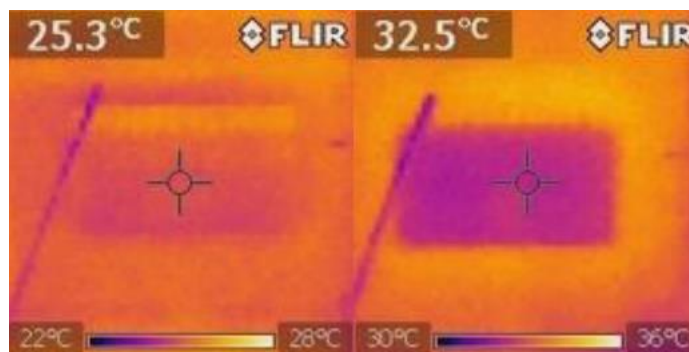


Figura 2-8 De izquierda a derecha, imagen termográfica tomada a las 7 de la mañana y a las 8 de la tarde del exterior de la fachada norte de la vivienda [44].

En el ámbito de la medición de los *U-value* con termografía infrarroja, los estudios con mayor importancia fueron realizados con mediciones desde fuera del edificio por autores como Albatici y Tonelli [18][57], proponiendo una nueva metodología experimental utilizando la técnica de termovisión por infrarrojos (IRT) con el fin de adquirir datos cuantitativos de las transmisiones térmicas reales de la envolvente del edificio en condiciones de estado cuasi-estacionario [17].

Aunque la norma italiana UNI 9252:1988 [55] establece que la técnica de termovisión por infrarrojos es solo un método “cualitativo” que se puede utilizar solo para evaluar y analizar la irregularidad térmica de la envolvente del edificio y no para determinar su nivel de aislamiento térmico, los autores consideran que, si el levantamiento termográfico se realiza por un técnico con conocimientos específicos de termotecnia y física de la edificación y de manera adecuada se sigue el procedimiento, el resultado de la prueba puede ser significativo y complementario al realizado con el método del medidor de flujo térmico. En segundo lugar, establecen que la IRT es más rápida (un edificio completo de tamaño mediano de 900 m² puede ser inspeccionado en 1 día) y se puede repetir en poco tiempo para verificar resultados anteriores si es necesario, incluso con diferentes condiciones de contorno. Finalmente, es un método no destructivo que no tiene influencia en la vida normal de los usuarios durante la campaña de monitoreo [18][57].

El método que exponen consiste en considerar algunos elementos que actúan como cuerpos negros, uno para la temperatura exterior y otro para la temperatura interior. Para la temperatura exterior, una buena aproximación del cuerpo negro teórico utiliza una manguera curvada, incluso parcialmente enrollada, cuya longitud sea al menos un orden de magnitud mayor que su diámetro o incluso llegan a utilizar una caja de cartón con un pequeño agujero. Ambos deben colocarse lejos de fuentes de calor o del propio edificio para minimizar posibles interacciones. Una hora en un campo abierto en las proximidades del edificio podría ser suficiente. Para la temperatura interior, se tomó imágenes termográficas de la fachada con una ventana parcialmente abierta de repente para registrar incluso el entorno interior. En este caso, el cuerpo negro se representó por la apertura parcial de la ventana, cuyas dimensiones están limitadas con respecto a la habitación cuya temperatura se está detectando [17].

Es importante destacar que, con la técnica de termovisión, se registran datos relacionados con la temperatura de radiación. Por lo tanto, una vez que se mide el valor de la emisividad para cada superficie de los elementos del edificio, los datos (ver Tabla 2-1) se corrigen de tal manera que se adquiera el valor real de la temperatura superficial T_i . En cuanto a los valores registrados de T_{out} y T_{int} , al ser la emisividad muy cercana a la de un cuerpo negro, se pueden considerar coincidentes con los reales [17]. En lo que respecta a la emisividad del espectro completo, se utilizaron los valores impresos en manuales especializados.

Se estudió esta técnica en tres casos; dos de ellos son edificios de estructura ligera (véase composición en Tabla 2-1), mientras que el otro caso se refiere a un edificio de estructura pesada. El primer caso además es comparado los resultados del IRT con los del HFM [17].

Material	s (grosor) (m)	c (capacidad térmica) (kJ/(kg·K))	λ (conductividad térmica) (W/(m·K))	ρ (densidad) (kg/m ³)
Yeso	0,02	0,84	0,9	1800
Poliestireno	0,03	1,380	0,037	35
Contrachapado	0,01	2,092	0,144	800
Poliestireno	0,035	1,380	0,037	35
Contrachapado	0,01	2,092	0,144	800
Lana de roca	0,04	0,836	0,04	40
Aire	0,06	1,004	0,333	1
Placa de yeso	0,018	0,837	0,21	900

Tabla 2-1. Material y características térmicas de las capas de las paredes externas en el caso del primer estudio basado en una casa familiar [18].

Se observó que la desviación de los valores medidos en laboratorio y los valores reales encontrados en la producción habitual puede ser del 5% al 50%. Por ello, la norma proporciona un valor modificado considerando el nivel de humedad promedio en condiciones de uso reales, el envejecimiento, el posible apisonamiento de materiales sueltos, la manipulación, la instalación realizada según el reglamento, y la tolerancia del grosor. El valor se aumenta del 10 % al 50 %, a veces incluso al 100 %, según el material [17].

Fue evidente que la estimación del *U-value* (Tabla 2-2) depende principalmente del valor de emisividad del material que compone el elemento del edificio, pudiendo diferir con el mismo porcentaje. Dado que este trabajo de investigación fue el primero que consideró el uso del método IRT para el estudio del *U-value* in situ de elementos de construcción, no existían otros datos en la literatura para comparar la desviación encontrada en el estudio de los tres casos que se estudiaron. Concluyeron que se necesitaban más trabajos de investigación en varios estudios de casos siguiendo la metodología que se propuso para establecer una correlación promedio entre los resultados de la medición y el valor teórico obtenido con normas técnicas [17].

Periodo (día y mes)	<i>U-value</i> método IRT (W/(m ² ·K))	<i>U-value</i> método HFM (W/(m ² ·K))
12-12 a 17-12	0,68	0,49
26-12 a 3-1	0,68	0,54
1-1 a 7-1	0,72	0,74
4-1 a 7-1	0,80	0,40
23-1 a 27-1	0,71	0,48

Tabla 2-2 *U-value* calculadas con los distintos métodos en la fachada norte del primer caso de estudio desde una segunda quincena de diciembre a finales del enero siguiente [17].

Por otro lado, Fokaides [56] llevó a cabo pruebas desde el interior del edificio. Según Fokaides, la termografía infrarroja externa tiene varias limitaciones. En primer lugar, la externa es más susceptible a las condiciones ambientales que la termografía infrarroja interna, proporcionando ésta última un entorno mucho más controlado con fluctuaciones climáticas más lentas y menos significativas. En segundo lugar, muchos objetos con estado térmico no conocido pueden reflejarse en el objetivo sin un control del índice de reflexión. En este artículo, el objetivo es determinar el *U-value* desde el interior de construcciones típicas de edificios en Chipre utilizando termografía infrarroja (IRT), validando así los resultados con los valores teóricos y el uso de termotermohigrómetros durante dos estaciones, verano e invierno, y con el uso de medidores de flujo de calor. Se demuestra así que la termografía infrarroja es adecuada para dichas estimaciones comparándola con mediciones usando termohigrometría [56].

La campaña de medición se llevó a cabo durante agosto de 2009 y febrero de 2010. Los edificios utilizados se acomodaron para lograr unas condiciones de estado estacionario, por ejemplo, enfriándolos o calentándolos durante al menos 3 horas antes de las mediciones. La temperatura superficial de cada elemento de construcción se midió cada 20 minutos durante un total de 3 horas calculando el *U-value* como el promedio de estas 10 mediciones de la mampostería, techos y ventanas [56].

Posteriormente con los resultados estimados de los *U-value* para los periodos de calentamiento y enfriamientos obtenidos aplicando la termografía IR y la termohigrometría, se concluyó que la desviación porcentual entre los *U-value* teóricos (ver Tabla 2-3) y obtenidos se encontraban en un nivel aceptable, en el rango de un 10 % y 20 % (Figura 2-9). Se evidenció como el material que presenta mayor desviación en todos los casos por ambos métodos era el techo debido a su alta exposición solar inevitable durante todo el arco diurno, lo que lleva a la prevalencia de efectos de inercia térmica [56].

ID	Zona	Área (m ²)	Año de Construcción	U-value teórico (W/(m ² ·K))	Mampostería	Techo	Ventanas
1	1	80	1920	2,1	1,52	2,7	2,7
2	1	180	1971	1,39	3,33	5,8	5,8
3	2	150	1989	0,42	3,33	1,6	1,6
4	2	180	2004	1,39	0,56	1,6	1,6
5	3	98	2008	1,39	0,55	2,7	2,7

Tabla 2-3 U-value de los diferentes elementos de las construcciones estudiadas en distintas zonas. Siendo zona 1: zona de costa; zona 2: zona de interior; zona 3: zona entre montañas [56].

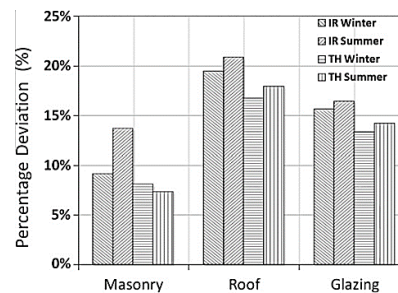


Figura 2-9 Porcentaje de desviación absoluta entre los U-value teóricos y medidos para termografía infrarroja (IRT) y termohigrometría (TH) [56].

Según Dall'O [57], se adentró, como otros, en la posibilidad de utilizar inspecciones infrarrojas para obtener información tanto cuantitativa como cualitativa, con base a la cual, se puede realizar una evaluación indirecta del *U-value* de las paredes en edificios existentes. Se pudo concluir que el coeficiente convectivo externo no se puede considerar constante en pruebas exteriores debiéndose calcular en función de las condiciones meteorológicas para obtener un resultado aceptable [57].

La metodología que se propuso no permite la determinación de un único *U-value* de transmitancia térmica, sino más bien un rango dentro del cual es probable que se encuentre el valor, usando un método de investigación rápido y no invasivo. La comparación entre el rango de valores de transmitancia obtenidos y los reales derivados de la documentación que se proporcionó en el estudio muestra que este método, en el caso de edificios con paredes aisladas externamente, no es muy confiable ya que los errores son elevados (ver Tabla 2-4, casos #13 y #14) [57].

			Edificio							
			Temperatura (°C)	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7
Temperatura de referencia (°C)			-	4,6	-2,8	0,5	-4,2	0,6	-0,1	-2,1
Temperatura media de la pared (°C)			-	6,1	-0,6	6,3	-0,7	4,5	2,5	2,6
U-value de diseño (W/m²·K)			-	1,03	1,03	1,53	1	1,04	1,04	1,04
Flujo de calor (W)			-	10,7	15,69	41,36	24,96	27,81	18,54	33,51
velocidad del viento = 1 m/s	U-value medido (W/m²·K)	18	0,80	0,75	2,36	1,12	1,60	1,02	1,67	
		22	0,61	0,63	1,92	0,95	1,30	0,84	1,39	
	Porcentaje de desviación (%)	18	-22	-27	54,8	12,3	53,4	-1	60,0	
		22	-40	-38	26	-4,8	24,7	-19	33,5	
	Flujo de calor (W)		-	8,70	12,76	33,64	20,30	22,62	15,08	27,26
	velocidad del viento = 0 m/s	U-value medido (W/m²·K)	18	0,65	0,61	1,92	0,91	1,30	0,83	1,36
22			0,5	0,51	1,56	0,77	1,06	0,68	1,13	
Porcentaje de desviación (%)		18	-37	-40	26	-8	24,8	-20	30,2	
		22	-51	-50	2,5	-22	1,5	-34	8,6	

	Temperatura (°C)	#8	#9	#10	#11	#12	#13	#14
Temperatura de referencia (°C)	-	2,8	5,7	5,0	4,2	3,0	1,9	7,0
Temperatura media de la pared (°C)	-	4,6	7,3	5,9	5,0	3,4	3,1	7,8
<i>U-value</i> de diseño (W/m ² ·K)	-	1,04	1,03	0,40	0,38	0,39	0,28	0,20
Flujo de calor (W)	-	12,83	11,41	6,42	5,70	2,85	8,56	5,70
velocidad del viento = 1 m/s	<i>U-value</i> medido (W/m ² ·K)	18	0,84	0,93	0,49	0,41	0,19	0,53
		22	0,67	0,70	0,38	0,32	0,15	0,43
	Porcentaje de desviación (%)	18	-19	-10	24,9	9,7	-50	88,1
		22	-35	-32	-4	-14	-61	50,6
	Flujo de calor (W)	-	10,44	9,28	5,22	4,64	2,32	6,96
		18	0,69	0,75	0,40	0,34	0,15	0,43
velocidad del viento = 0 m/s	<i>U-value</i> medido (W/m ² ·K)	22	0,54	0,57	0,31	0,26	0,12	0,35
	Porcentaje de desviación (%)	18	-34	-27	1,6	-10	-59	53,0
		22	-47	-44	-22	-30	-68	22,5
								51,5

Tabla 2-4 Características térmicas y desviación absoluta porcentual entre el *U-value* calculado y medido [57].

Por otro lado, el estudio concluyó que este tipo de evaluación es confiable para paredes de masa sólida, para las cuales el porcentaje de error es menor en comparación con el HFM (ver Tabla 2-4, casos del #1 al #12) [57].

En los últimos años, la autora Tejedor [25], analizó el problema de la ignorancia del comportamiento térmico de los edificios en su época de construcción. El método HFM era comúnmente utilizado para determinar el *U-value*, sin embargo; al ser una prueba no invasiva que llevaba al menos 72 horas para su ejecución con un acierto de entre el 14 %-28 %, no era confiable para elementos de construcción no homogéneos. Se centró en el uso de la técnica IRT, la cual, aunque se utilizaba para el análisis cualitativo de las paredes, pudo comprobar que era factible utilizarla para calcular los *U-value* de éstas con una desviación del 1 %-2 % de una sola hoja, y del 3 %-4 % para paredes de varias hojas tardando alrededor de 2-3 horas [23].

Este método, al proporcionar información sobre la envolvente de un edificio, permite verificar el comportamiento térmico de las fachadas según los parámetros de diseño. Además, representa una mejora importante en las regulaciones de hoy día en las paredes con bajos *U-value* donde el uso de valores tabulados dirige hacia transmisiones térmicas sobreestimadas.

Se concluyó que el método que se propone puede llegar a ser de gran utilidad para profesionales e investigadores del mundo de la construcción, obteniendo, por ejemplo; información ventajosa y necesaria sobre el rendimiento de las paredes de manera generalizada en el ámbito nacional que podría ayudar a tomar decisiones en relación con la realización de reformas en ellas; reduciendo así también, la brecha del rendimiento energético en edificios de nueva construcción. Es de éste último trabajo del que se extraerá de la ecuación utilizada para sus cálculos.

Más adelante en 2021, esta misma autora contribuyó con el desarrollo de un método para la creación de un mapeado en 2D de los *U-value* (Figura 2-10). Se centraba en fachadas enteras de edificios operando con termografía infrarroja conduciendo a una herramienta de diagnóstico mejor y más precisa que utilizando otras técnicas de medición o simulación adicionales [58].

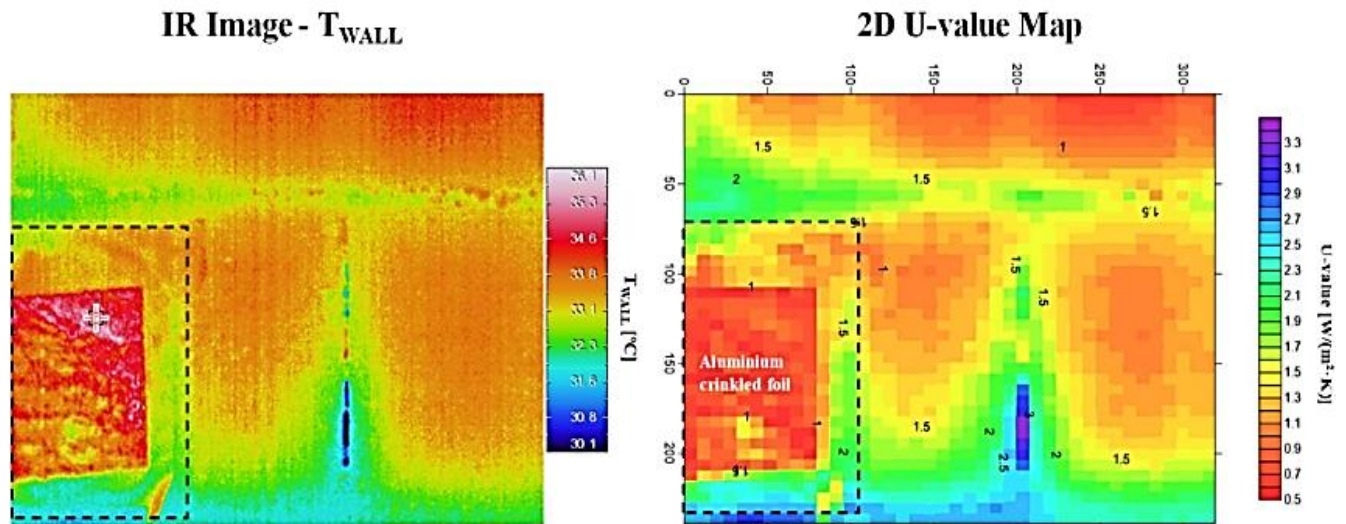


Figura 2-10 Imagen IR de la temperatura de una pared de una sola hoja estudiada en el trabajo con su representación en 2D de los U-value calculados [58].

El proceso automatizado proporcionó una identificación completa de las cavidades internas y las áreas de impacto en las zonas estudiadas, destacando la distribución de la transmitancia térmica en toda la pared. Esta función del mapeado con IRT supone algo bastante complejo, incluso imposible, con el uso de otros métodos estandarizados como puede ser el HFM ya que proporcionan sólo mediciones locales. Con la técnica expuesta en el trabajo, el técnico es capaz de observar dónde existen problemas urgentes de solucionar en la estructura del edificio (Figura 2-10) [58].

Se ha expuesto el estado del arte relacionado con el trabajo de fin de grado que se ha desarrollado. En él se han expuesto, entre otros muchos más temas; los principales trabajos de IRT en los cuales se ha basado el TFG. Se ha hecho especial énfasis en la autora Tejedor dado que se ha tomado como referencia el método desarrollado en uno de sus trabajos [23]. A continuación se dará paso al desarrollo de este TFG.

3 DESARROLLO DEL TFG

3.1 Metodología utilizada

Este trabajo se ha centrado en el estudio de transmitancia térmica utilizando la técnica IRT, que se encuentra definida por la EN 13187:1998 [59] y las Directrices Provisionales de RESNET para Inspección Termográfica de Edificios [60]. Para esta técnica la autora B. Tejedor [23] estableció ciertas condiciones límites, de las cuales se han cumplido casi todas.

Las pruebas deben llevarse a cabo en la fachada norte del edificio a estudiar y preferiblemente antes del amanecer o después del ocaso evitando así la influencia de la radiación solar. En este trabajo, se han tomado datos antes y después del orto solar y se ha estudiado además la fachada sur del edificio del CUD para comparar los resultados con los de la cara norte de dicha fachada (ver apartado 3.5).

Las medidas se deben realizar con una diferencia de temperatura entre el exterior del edificio y su interior de al menos 10-15 °C, permitiendo así el intercambio de calor medible a través de los elementos constructivos de las paredes. La humedad, la lluvia y la nieve deben evitarse al menos 24-48 horas antes de los estudios, una condición que se ha cumplido pese a la dificultad de encontrar una semana donde no hubiera precipitaciones debido a la situación geográfica en donde se encuentra el edificio del CUD [23].

Se debe evitar un régimen no estacionario prestando especial atención al tipo de fachada del edificio, las condiciones meteorológicas externas o las condiciones climáticas internas. En primer lugar, las paredes adyacentes calentadas pueden influir en el comportamiento térmico de la zona que se está midiendo. Las temperaturas en las esquinas suelen ser más altas, y en consecuencia, el *U-value* medido sufre variaciones. En segundo lugar, las temperaturas exteriores del aire permanecen más constantes durante algunos períodos del día. Las pruebas deben realizarse al inicio del día, para garantizar una diferencia de temperatura óptima (ΔT) sin picos. En tercer lugar, cualquier pico de corriente de aire generado cuando la temperatura del aire interior está por debajo de la temperatura de consigna puede provocar una fluctuación en los parámetros internos [23]. A continuación, se describe los pasos llevados a cabo:

Paso 1: Selección del equipo de medición

Se necesita una cámara IR, un reflector y un cuerpo negro para medir cuantitativamente los *U-value* en la zona a estudiar mediante IRT. Se requieren además termopares con un registrador de datos, o un termotermohigrómetro, para medir las condiciones ambientales [23].

Varios investigadores han especificado en sus estudios que los requisitos mínimos para una cámara IR están relacionados con: el rango espectral, la resolución espacial, el rango de temperatura, la sensibilidad térmica, la frecuencia de cuadros y el ángulo de inclinación [23].

Teniendo en cuenta que los cuerpos a temperatura ambiente emiten predominantemente en 7-13 μm (rango espectral), la cámara IR debe seleccionarse para la banda de longitud de onda larga. La resolución espacial, también conocida como Campo de Visión Instantáneo (IFOV), es la capacidad de la cámara para distinguir entre dos objetos dentro del campo de visión. En otras palabras, es el detalle más pequeño dentro del campo de visión que se puede detectar o ver a una distancia determinada. Para el diagnóstico de edificios, el FOV se describe en grados horizontales por grados verticales, y el IFOV se establece como 1,36 mrad. La sensibilidad térmica debe seleccionarse como 0,05 °C para cámaras no enfriadas y 0,01 °C para cámaras enfriadas; y el número de cuadros adquiridos por la cámara IR por segundo (frecuencia de cuadros) normalmente se establece en 50Hz. Finalmente, para evitar cualquier reflexión del termógrafo en las imágenes resultantes, el ángulo de inclinación debe ser un mínimo de 5 ° desde el termógrafo hasta el objeto objetivo y un máximo de 50 ° desde el horizontal [23].

Antes de realizar las mediciones, la cámara IR debe calibrarse para la pared. En otras palabras, se requieren la temperatura ambiente reflejada (T_{ref}) y la emisividad de la superficie de la pared para compensar los errores de lectura con la cámara IR. Estos parámetros permiten obtener valores de temperatura superficial fiables en el área de emisividad conocida durante el post procesamiento de cada termograma [23], tal y como se ha explicado en apartados previos.

Para determinar este parámetro, se debe usar un trozo de papel de aluminio arrugado fijado en la superficie como reflector o sustituto del radiador de Lambert. Para evitar índices de reflexión no controlados, la pared bajo medición debe estar libre de cualquier objeto. Se necesita un cuerpo negro para medir la emisividad de la superficie de la pared. En teoría de la radiación térmica, un cuerpo negro se considera un objeto hipotético que absorbe toda la radiación incidente y emite un espectro continuo, de acuerdo con la Ley de Planck y la Ley de Stefan-Boltzmann [23].

Finalmente, pueden surgir algunas incertidumbres en la cadena de medición debido al sensor de temperatura y su registrador de datos. Por esta razón, se deben tener en cuenta el tipo de sensor, la posición del sensor, la linealidad y la sensibilidad del sensor, la deriva del sensor y la calibración del elemento. Se prefieren termopares tipo K con una resolución de 0,1 °C y una precisión de $\pm 0,4 \% + 1\text{ }^{\circ}\text{C}$. El registrador de datos debe permitir mediciones dentro del rango de temperatura de 0 a 50 °C, y una humedad relativa por debajo del 85 %. Además, el intervalo de adquisición de datos debe ser de 1 segundo a 3600 segundos [23].

Paso 2: Adquisición de datos y post procesamiento

La cámara IR debe colocarse en un trípode perpendicular a la pared a una distancia de 1,5 metros y un ángulo de 15 °, para evitar su propia reflexión en el elemento del edificio. Esta distancia es suficiente para analizar un área amplia de la pared característica del comportamiento térmico de la fachada del edificio, incluido el papel de aluminio reflectante (ver Figura 3-1) [23].



Figura 3-1 Papel de aluminio reflectante en la pared a estudiar [Autoría propia].

Las mediciones deben realizarse y registrarse durante un período de 2-3 horas. En los casos de este trabajo, los intervalos fueron desde media hora a cercano a la hora y media, buscando el análisis en condiciones no óptimas, con un intervalo de adquisición de datos de 1 minuto por la cámara IR y el software FLIR TOOLS+. Por lo tanto, cada prueba implica el análisis de un video secuencial con 121 a 181 termogramas. Todos los registradores de datos están configurados para recopilar mediciones de los sensores de temperatura con el mismo intervalo de adquisición de datos que la cámara IR (1 minuto). Las condiciones ambientales circundantes también se monitorean y registran continuamente durante la duración de la prueba en el sitio mediante registradores de datos y termopares [23].

El postprocesamiento de los termogramas se lleva a cabo con el software mencionado anteriormente. Las lecturas instantáneas de la temperatura superficial de la pared (T_{wall}) y la temperatura ambiente reflejada (T_{ref}) de cada termograma deben considerarse para determinar el U -value medido. La temperatura ambiente reflejada promedio (T_{ref}) debe medirse en un área del reflector ubicada a 1,5 m sobre el nivel del suelo para evitar cualquier reflexión del suelo y la mayoría de los muebles. Además, el termopar de T_{in} debe posicionarse a la misma altura. Dado que este método de IRT se realiza dentro del edificio, la altura de las paredes es de alrededor de 2,5-3,0 m. Por lo tanto, una altura de 1,5 m es aceptable para considerar un valor de temperatura ambiente interior promedio, aproximadamente igual a T_{ref} . La temperatura superficial de la pared (T_{wall}) debe calcularse midiendo los valores medios de la superficie total del elemento del edificio que se está evaluando [23].

Paso 3: Cálculo del U -value medido instantáneo utilizando el modelo numérico

Para el cálculo de la U -value utilizando el modelo numérico o matemático se ha utilizado la siguiente ecuación (Ecuación 5), en donde se calcula teniendo en cuenta los siguientes parámetros:

- L : Altura de la pared donde se realiza el estudio (m).
- k : Conductividad térmica del fluido, en este caso del aire; que tiene un valor de $k= 0,025$ W/(m·k).
- T_{in} : Temperatura del interior del aire (°C).
- T_{out} : Temperatura exterior del aire (°C).
- T_{wall} : Temperatura superficial interna de la pared (°C).
- T_{ref} : Temperatura reflejada (°C).
- ε : Emisividad de la pared (-).
- σ : Constante de Stefan-Boltzmann= $5,67 \cdot 10^{-8}$ (W/(m²·k⁴)).
- R_a : Número de Rayleigh. Al tratarse de un flujo laminar como es el aire; R_a se encuentra entre el rango de 10^4 y 10^{10} (-) (Ecuación 6).
- β : Coeficiente expansión temperatura volumétrica (1/°C) (Ecuación 7).

$$U_{mes} \left[\frac{W}{m^2 \cdot K} \right] = \frac{\left(\frac{k}{L} \right) \cdot \left[0,825 + 0,325 \cdot R_a^{1/6} \right]^2 \cdot (T_{in} - T_{wall}) + \varepsilon \cdot \sigma \cdot [T_{ref}^4 - T_{wall}^4]}{(T_{in} - T_{out})} \quad (\text{Ecuación 5})$$

$$R_a = 3,18 \cdot 10^{10} \cdot \beta \cdot (T_{in} - T_{wall}) \cdot L^3 \quad (\text{Ecuación 6})$$

$$\beta = \frac{1}{(T_{in} - T_{wall})/2} \quad (\text{Ecuación 7})$$

Paso 4: Cálculo de la U-value teórica para su posterior comparación con la obtenida.

Este paso se ha basado en el cálculo de la transmitancia térmica expuesta por el Ministerio de Transporte, Movilidad y Agenda Urbana del Gobierno de España en enero de 2020 en el DA-BH/1 del Código de Técnico de la Edificación (CTE) [61].

Para calcular la U-value teórica de la envolvente del edificio del CUD en las zonas de estudio de los casos A y B (ver apartado 3.6), se ha realizado tomando como referencia las siguientes expresiones expuestas a continuación (Ecuación 8, Ecuación 9 y Ecuación 10):

$$U_{th} = \frac{1}{R_t} \quad (\text{Ecuación 8})$$

Siendo R_t la resistencia térmica total del componente constructivo ($m^2 \cdot K/W$). Dicha resistencia corresponde al conjunto de las capas térmicamente homogéneas.

$$R_t = R_{si} + R_1 + R_2 + \dots + R_n + R_{se} \quad (\text{Ecuación 9})$$

$$R_n = \frac{e}{\lambda} \quad (\text{Ecuación 10})$$

En donde aparecen los siguientes parámetros:

- R_n : resistencia térmica de la capa 'n' ($m^2 \cdot K/W$).
- R_{si} y R_{se} : resistencias térmicas superficiales que corresponden al aire interior y el aire exterior respectivamente ($(m^2 \cdot K)/W$).
- e : espesor de la capa (m).
- λ : conductividad térmica de diseño del material que conforma la capa ($W/(m \cdot K)$).

Los datos de conductividad térmica de cada material que conforma la envolvente el edificio estudiado se han recopilado del Catálogo de elementos constructivos de la edificación del CTE [62]

3.2 Descripción detallada del material utilizado

En este apartado se hablará en detalle de las cámaras termográficas para medir la T_{wall} , los sensores IButtons, que son medidores puntuales de temperatura para medir T_{in} y T_{out} , y el termohigrómetro digital con indicación con el punto de condensación que permite medir temperatura y humedad relativa, necesarias para estimar la transmitancia atmosférica (ver apartados previos). El papel de aluminio para obtener la T_{ref} con las cámaras termográficas, la cinta negra para obtener la emisividad de nuevo con las cámaras, y el flexómetro para medir la altura de la pared, y la distancia entre cámara y pared necesaria también para la transmitancia atmosférica, no se vuelve a explicar en este apartado ya que no hay información sustancial a exponer.

Cámaras termográficas

Se distinguen dos cámaras diferenciadas principalmente por la calidad de éstas respecto a la toma de imágenes, temperaturas y sistema de procesamiento de la herramienta; además también por la diferencia de precio en el mercado de ambas, siendo una de ellas considerada *low cost*.

Ambas cámaras pertenecen a FLIR Systems, marca líder en el mercado internacional de cámaras termográficas. La palabra FLIR es un acrónimo que en español se traduce como ‘Infrarrojo de Visión Frontal’. La compañía ofrece diversas herramientas utilizadas en la inspección de edificios, seguridad y otras funciones donde la detección de calor en las paredes es crucial como la detección de incendios.

La principal característica común que presentan ambas cámaras es que disponen del sistema MSX, dando la capacidad de juntar las imágenes térmicas y visuales; con el fin de proporcionar una mejor imagen visual de la zona a medir y clarificar la imagen térmica.

Para medir la misma zona de la pared al mismo tiempo con ambas cámaras, se juntó la cámara FLIR OneEdge (*low cost*) a la parte izquierda del mango de la cámara FLIR E85 (alta gama) sujetándola con cinta americana para impedir el movimiento durante su uso (véase Figura 3-2). De esta forma, la zona a medir se visualiza a través de la pantalla anterior de la cámara FLIR E85, y en la pantalla del móvil a través de la aplicación vinculada a la cámara FLIR OneEdge desde dónde se controla el modo grabación de la cámara.

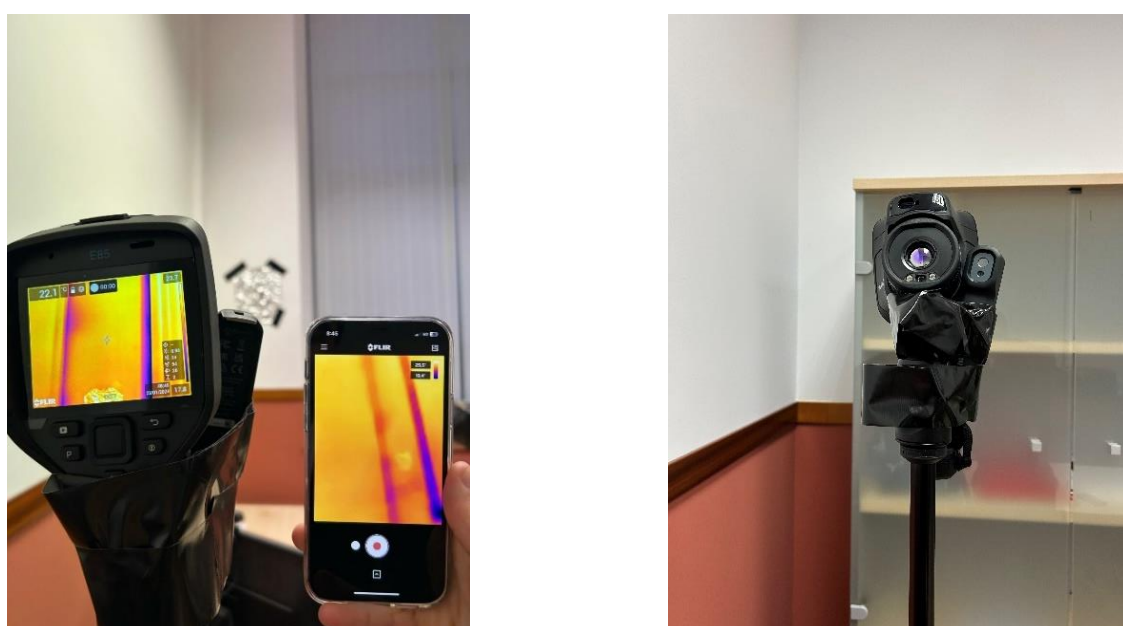


Figura 3-2 Cámaras FLIR en disposición de medir en el primer caso estudiado [Autoría propia].

A continuación se exponen las dos cámaras utilizadas con sus principales características.

Cámara FLIR E85

La FLIR E85 (Figura 3-3) es una cámara de gama alta de FLIR Systems dotada de una combinación de características y rendimiento enfocada en campos como la construcción, la inspección eléctrica, la ingeniería mecánica o la inspección de edificios (campo al que se enfoca el TFG). Es la versión mejorada de la FLIR E75, puesto que incluye actualizaciones como la incorporación de pantalla táctil, la capacidad de incluir lentes sin tener que volver a calibrar la cámara o un nuevo sistema de autoenfoco láser con el fin de tomar las imágenes con una mayor nitidez. Las características de la cámara FLIR E85 se encuentran reflejadas en Tabla 3-1.



Figura 3-3 Cámara FLIR E85 [63].

FLIR E85	CARACTERÍSTICAS
Resolución térmica	384x288 (110,592 píxeles)
Resolución visible	5 megapíxeles
Resolución de pantalla	640x480
Rango de temperaturas	Desde -20 °C hasta 1200 °C
Exactitud	±2 °C o ±2 %
Sensibilidad térmica	<40 mK a 30 °C
Distancia de concentración	Desde 0,5 hasta 19,7 metros
Opción de paletas	Múltiple: Iron, Gray, Rainbow, Artic, Lava, Rainbow HC (High Contrast)
Emisividad	Sí, variable desde 0.01 hasta 1.0
Batería	Dispone de 2 baterías recargables de 3,6 V con una duración de ±2.5 horas a temperatura de trabajo de 25 °C
Precio (€)	≈ 10000

Tabla 3-1 Características de la cámara FLIR E85 [63].

Cámara FLIR OneEdge

La cámara FLIR OneEdge (Figura 3-4) se presenta como la alternativa *low cost* a la cámara anterior descrita. Su uso es más sencillo e intuitivo para el usuario, aunque presenta un enfoque y una resolución de mucha menor calidad. Como ya se ha mencionado previamente, esta cámara se usa conectándose, vía

Bluetooth o red Wifi; a una aplicación desarrollada por la empresa FLIR Systems para teléfonos móviles tanto Android como Apple. Además, al realizar videos de menor peso posibilita la subida de éstos a la nube para poder trabajar con ellos desde ahí facilitando aún más el uso de esta herramienta.



Figura 3-4 Cámara FLIR OneEdge acoplada a teléfono móvil [64].

Esta cámara además cuenta con un soporte en la parte interior en forma de gancho que posibilita el poder grabar desde casi cualquier parte colocándola enganchada en el móvil, haciendo de la FLIR OneEdge una cámara capaz de utilizarse en cualquier momento en la que se la necesite. Cuenta con una serie de características distintas a la FLIR E85, que se expondrán a continuación en Tabla 3-2.

FLIR OneEdge	CARACTERÍSTICAS
Resolución térmica	80x60 (4800 píxeles)
Resolución visual	640x480 (307,200 píxeles)
Rango de temperaturas	Desde -20 °C hasta 120 °C
Exactitud	± 3 °C o ± 5 %. Aplicable 60 segundos tras el encendido de la cámara, una vez se encuentra en el rango de 15 a 35 °C y el escenario se encuentra entre los 5 y los 120 °C
Sensibilidad térmica	70 mK
Distancia de concentración	± 0.3 metros
Opción de paletas	Múltiple: Gray, Hottest, Coldest, Iron, Contrast Artic, Lava and Color Wheel
Emisividad	No
Batería	Duración de hasta 2.5 horas
Zoom	No
Precio (€)	400-500

Tabla 3-2 Especificaciones FLIR OneEdge [65].

Sensores iButtons

Los sensores iButtons (Figura 3-5) utilizados en el desarrollo del trabajo son unos registradores de temperatura del modelo DS1922L. Éstos son unas herramientas que se ha usado para medir tanto la temperatura interior como exterior de cada habitación analizada con una velocidad máxima de una medida por minuto. Siendo capaz de almacenar más de 8000 lecturas de 8 bits o más de 4000 lecturas de 16 bits, no se ha tenido ningún problema a la hora de medir puesto que el tiempo no ha excedido de una hora y media en ninguno de los casos.



Figura 3-5 Sensores iButtons [66].

El sensor cuenta con una misión de recolección de datos programable para poder establecer un retraso definido por el usuario antes de comenzar la medición de temperaturas. Al contar con dos sensores de este modelo, en el que uno tomaba datos del exterior y el otro del interior del edificio; se ha utilizado la función anterior para aquel que se encontraba tras la envolvente del CUD para disponer del tiempo adecuado para salir a la explanada y colocarlo en un lugar óptimo para su medición (Figura 3-6).

El sensor iButton tiene una precisión de $\pm 0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ en un rango de temperaturas de $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $65\text{ }^{\circ}\text{C}$, por lo que se ha trabajado en todo momento dentro del intervalo de seguridad puesto que la mínima temperatura medida ha sido de $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ y la máxima de $26\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Aunque presentan una buena resistencia al agua y a la humedad; los días de medición se eligieron específicamente centrándose en si el día presentaba un tiempo uniforme sin precipitaciones para alterar lo menos posible las medidas del sensor. Con ayuda de cinta aislante se elaboró una base y un techo para mitigar lo máximo posible el traspaso de calor entre el sensor y la zona donde se encontraba apoyado midiendo como se observa en Figura 3-6.



Figura 3-6 Sensor iButton en el exterior del edificio [Autoría propia].

Los datos obtenidos por parte de estos sensores se han utilizado en el cálculo de la *U-value* de la envolvente estudiada en cada caso de estudio. A continuación, se adjunta una tabla de los 10 primeros minutos de la primera medición a modo de ejemplo (véase Tabla 3-3).

Date	Time	Unit	Value
23/01/2024	8:58:00	°C	16
23/01/2024	8:59:00	°C	16
23/01/2024	9:00:00	°C	16
23/01/2024	9:01:00	°C	16
23/01/2024	9:02:00	°C	16
23/01/2024	9:03:00	°C	16
23/01/2024	9:04:00	°C	16
23/01/2024	9:05:00	°C	16
23/01/2024	9:06:00	°C	16
23/01/2024	9:07:00	°C	16
23/01/2024	9:08:00	°C	16

Tabla 3-3 Primeros 10 minutos medidos por el sensor iButton en el exterior en el primer caso [Autoría propia].

Termohigrómetro digital con indicación con el punto de condensación

El Laserliner Climapilot (Figura 3-7) es un tipo de termohigrómetro digital capaz de tomar medidas de la humedad relativa del ambiente donde se encuentra, la temperatura ambiente del lugar e incluso la indicación del punto de condensación; factores que intervienen indirectamente en la ecuación utilizada para el cálculo de la *U-value*.



Figura 3-7 Termohigrómetro Laserliner Climapilot [67]

3.3 Programas comerciales FLIR

FLIR Tools (Figura 3-8) es una aplicación de software desarrollada por FLIR Systems que permite la gestión de imágenes térmicas y el análisis de los datos obtenidos durante las mediciones. Esta aplicación ofrece una amplia variedad de herramientas y funciones que se han utilizado con la cámara FLIR E85. Específicamente, se ha empleado la aplicación para la obtención de la temperatura media de la zona de interés de cada caso de estudio (Figura 3-9).

Por otra parte, se ha utilizado FLIR Ignite para la cámara FLIR OneEdge que permite cargar los archivos directamente en la nube donde posteriormente es posible la creación de informes, organizar los datos o exportarlos (Figura 3-10).



Figura 3-8 Logo de FLIR Tools [68].

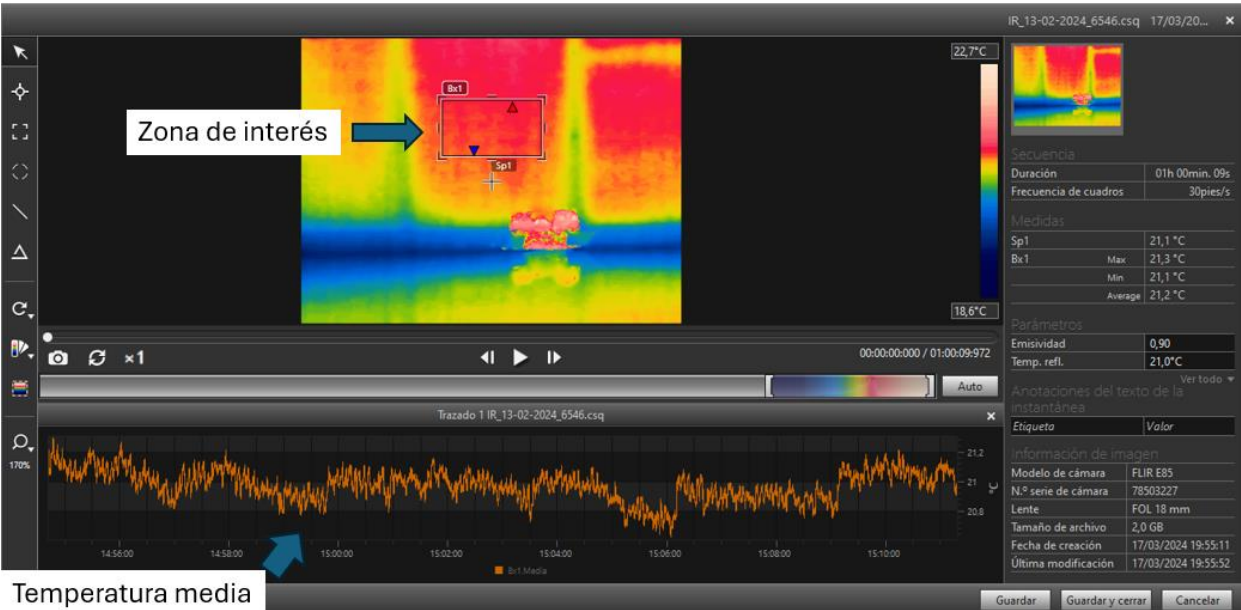


Figura 3-9 Momento de estudio del caso A [Autoría propia].

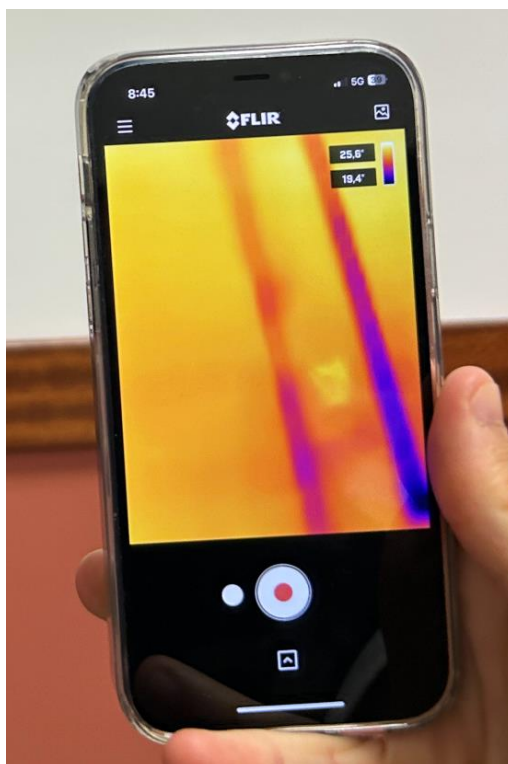


Figura 3-10 FLIR Ignite para móvil [Autoría propia].

3.4 Programas auxiliares utilizados

A partir del código descrito en el Anexo III, empleado Python como lenguaje de programación, se ha convertido dicho código en dos ejecutables diferentes mediante la herramienta de PyInstaller. El primer ejecutable es para guardar la temperatura píxel a píxel de las imágenes térmicas capturadas con la cámara FLIR E85, de la zona de interés en el caso de estudio en concreto, con una frecuencia temporal determinada, en este caso, de 1 minuto, frecuencia citada previamente. Con ello, se va a permitir convertir los píxeles de las imágenes de la cámara FLIR OneEdge de RGB (*Red-Green-Blue*) a unidades de °C, mediante correlaciones, ya que en RGB no se puede obtener la *U-Value*.

El primer paso es exportar en formato CSV la zona de interés de las imágenes desde el FLIR Tools (Figura 3-11). A continuación, al abrir el ejecutable desde la terminal del Sistema Operativo se introduce la ruta del CSV y el intervalo de los recortes hechos con la FLIR Tools por minuto deseado (Figura 3-12). Al terminar el ejecutable, los píxeles de cada recorte quedan reajustados de valor menor a mayor en una columna (unidimensional) para poder hacer la correlación, guardada cada columna en un archivo de texto diferente (Figura 3-13).

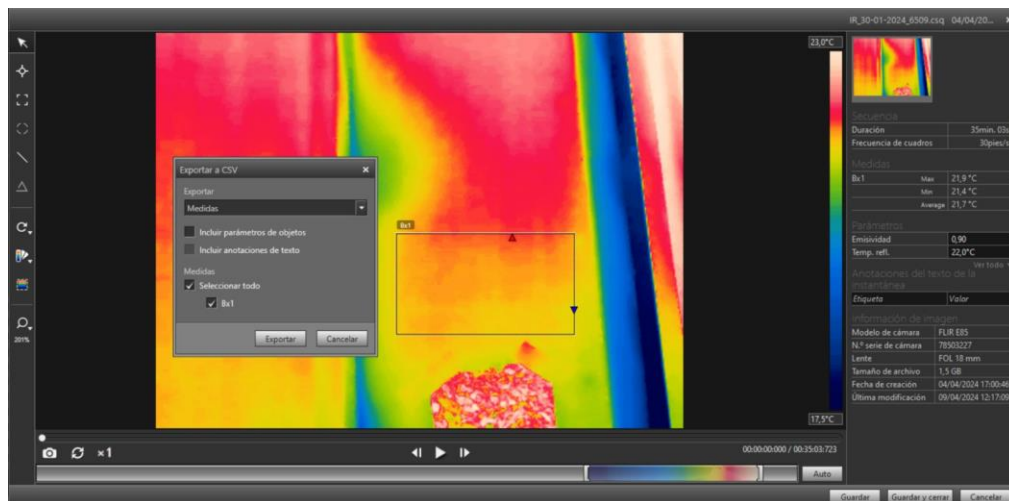


Figura 3-11 Exportación de la zona de interés del caso A en formato CSV [Autoría propia].

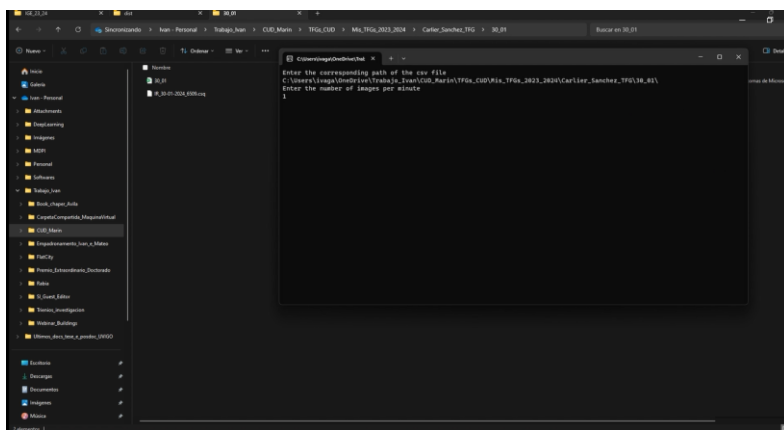


Figura 3-12 Ejecutable desde el Sistema Operativo con ruta del CSV [Autoría propia].

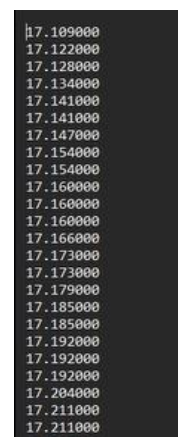
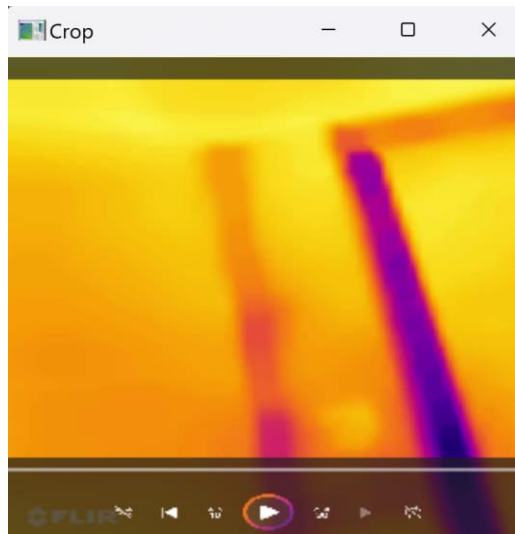


Figura 3-13 Correlación de los píxeles [Autoría propia].

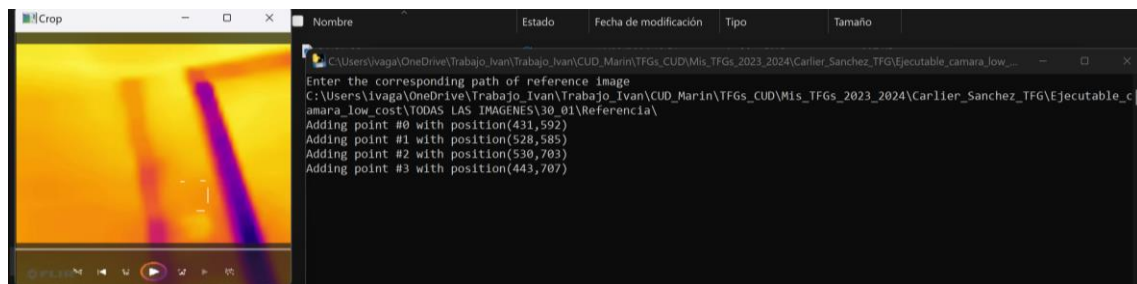
En cuanto al segundo ejecutable, al abrirlo desde la terminal del Sistema Operativo, se introduce la ruta en donde esté guardada una de las imágenes térmicas capturadas con la FLIR OneEdge, coincidente con el caso de estudio seleccionado con el primer ejecutable (Figura 3-14). Tras ello, se selecciona la misma zona de interés, mediante los botones del ratón (Figura 3-15).

```
C:\Users\ivaga\OneDrive\Trabajo_Ivan\Trabajo_Ivan\CUD_Marin\TFGs_CUD\Mis_TFGs_2023_2024\Carlier_Sanchez_TFG\Ejecutable_camara_low_cost\dist\TFG_Carlier.exe
Enter the corresponding path of the ref. file
C:\Users\ivaga\OneDrive\Trabajo_Ivan\Trabajo_Ivan\CUD_Marin\TFGs_CUD\Mis_TFGs_2023_2024\Carlier_Sanchez_TFG\TFG_01\Referencia\
```

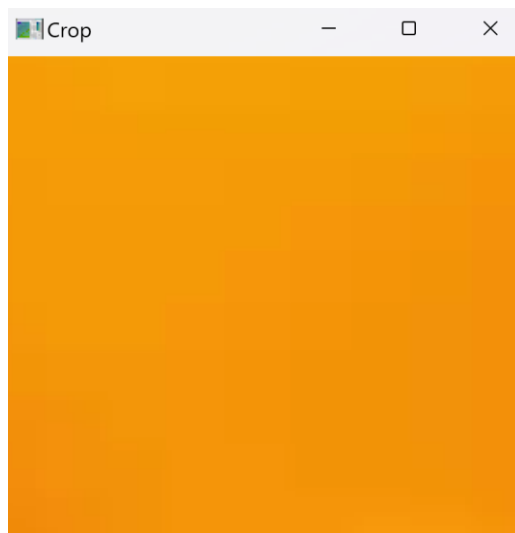
Figura 3-14 Apertura del segundo ejecutable, e introducción de la ruta asociada a la imagen de referencia del caso de estudio en concreto [Autoría propia]



a)



b)



c)

Figura 3-15 a) Apertura de la imagen de referencia, b) selección de la zona de interés (ver en la imagen los trazos blancos), c) y resultado del recorte [Autoría propia].

Con las acciones previas realizadas, desde la terminal se solicitará la ruta en donde está guardadas todas las imágenes de la FLIR OneEdge con respecto al caso de estudio en concreto, en donde el ejecutable recortará automáticamente a cada una según la zona de interés trazada previamente (Figura 3-16). Cabe a resaltar que las imágenes con la cámara *low cost* fueron seleccionadas las que correspondían a cada minuto a partir del vídeo grabado por la propia cámara, para así tener la misma

frecuencia temporal con respecto al primer ejecutable. A continuación, la terminal solicita al usuario las nuevas dimensiones deseadas de los recortes, teniendo que introducir las mismas dimensiones con respecto a la zona de interés del primer ejecutable, ya que se trazan manualmente en ambas cámaras y nunca van a ser exactamente iguales (Figura 3-17).

```
C:\Users\ivaga\OneDrive\Trabajo_Ivan\Trabajo_Ivan\CUD_Marin\TFGs_CUD\Mis_TFGs_2023_2024\Carlier_Sanchez_TFG\Ejecutable_camara_low_...
Enter the corresponding path of reference image
C:\Users\ivaga\OneDrive\Trabajo_Ivan\Trabajo_Ivan\CUD_Marin\TFGs_CUD\Mis_TFGs_2023_2024\Carlier_Sanchez_TFG\Ejecutable_c
amara_low_cost\TODAS LAS IMAGENES\30_01\Referencia\
Adding point #0 with position(431,592)
Adding point #1 with position(528,585)
Adding point #2 with position(530,703)
Adding point #3 with position(443,707)
Completing polygon with 4 points.
Enter the corresponding path of all images
C:\Users\ivaga\OneDrive\Trabajo_Ivan\Trabajo_Ivan\CUD_Marin\TFGs_CUD\Mis_TFGs_2023_2024\Carlier_Sanchez_TFG\Ejecutable_c
amara_low_cost\TODAS LAS IMAGENES\30_01\
```

Figura 3-16 Introducción de la ruta en donde se encuentra todas las imágenes de la FLIR OneEdge del caso de estudio en concreto [Autoría propia].

```
C:\Users\ivaga\OneDrive\Trabajo_Ivan\Trabajo_Ivan\CUD_Marin\TFGs_CUD\Mis_TFGs_2023_2024\Carlier_Sanchez_TFG\Ejecutable_camara_low_...
Enter the corresponding path of reference image
C:\Users\ivaga\OneDrive\Trabajo_Ivan\Trabajo_Ivan\CUD_Marin\TFGs_CUD\Mis_TFGs_2023_2024\Carlier_Sanchez_TFG\Ejecutable_c
amara_low_cost\TODAS LAS IMAGENES\30_01\Referencia\
Adding point #0 with position(431,592)
Adding point #1 with position(528,585)
Adding point #2 with position(530,703)
Adding point #3 with position(443,707)
Completing polygon with 4 points.
Enter the corresponding path of all images
C:\Users\ivaga\OneDrive\Trabajo_Ivan\Trabajo_Ivan\CUD_Marin\TFGs_CUD\Mis_TFGs_2023_2024\Carlier_Sanchez_TFG\Ejecutable_c
amara_low_cost\TODAS LAS IMAGENES\30_01\
Enter the new size of images
74,130
```

Figura 3-17 Introducción de las dimensiones deseadas de cada recorte [Autoría propia].

Con todos los pasos realizados, el segundo ejecutable arrojará resultados equivalentes al primer ejecutable, es decir, los píxeles de cada recorte quedan reajustados de valor menor a mayor en una columna (unidimensional) para poder hacer la correlación, guardado cada columna en un archivo de texto diferente. Hay que subrayar que se exporta el valor promedio RGB de cada píxel, para tener solo un canal (como las imágenes de la FLIR E85, que tienen como canal los valores de los píxeles en °C), y no tres (las imágenes de la FLIR OneEdge en cada píxel hay un valor para *Red*, otro para *Green* y otro para *Blue*) (Figura 3-18).

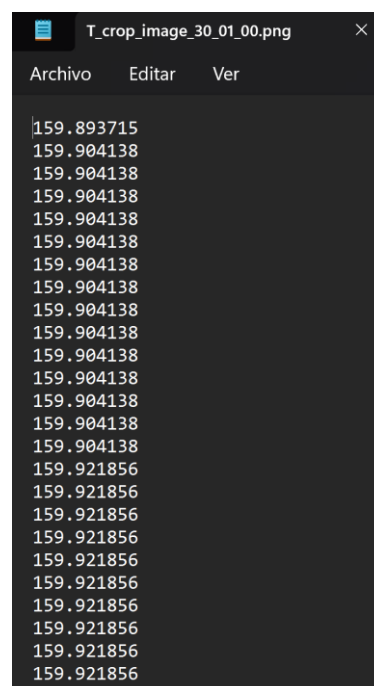


Figura 3-18 Resultado final del segundo ejecutable [Autoría propia].

3.5 Centro Universitario de la Defensa en Marín (Pontevedra)

El CUD es una institución académica con un historia y características peculiares que hace de éste un referente en el ámbito educativo y de investigación de la Armada. Ubicada estratégicamente en la Escuela Naval Militar (ENM) en Marín (Pontevedra) (Figura 3-19), se destaca por su papel crucial en la formación técnica de los futuros oficiales de la Armada y por su excelencia académica enfocándose en áreas especializadas relacionadas con la seguridad, la defensa y la tecnología militar.



Figura 3-19 Escuela Naval Militar (42° 23' 48,6'' N, 8° 42' 12,6'' W) [69].

El centro ofrece una amplia gama de grados y posgrado, así como también oportunidades de investigación interdisciplinaria colaborando con instituciones nacionales e internacionales. La institución cuenta con instalaciones modernas que se encuentran equipadas con tecnología de vanguardia brindando así, una capacidad de enseñanza innovadora y práctica. Su cuerpo docente, además de estar formado por docentes civiles e investigadores; cuenta además con profesionales de la Armada dando un enfoque militar a toda la formación impartida en el CUD. El Centro cuenta con tres grandes edificios con amplias aulas para impartir la enseñanza de manera teórica y práctica.

Con El plan Miranda en 1915 ideado por el ministro de Marina de entonces, el almirante Don Augusto Miranda Godoy; se estableció la creación de bases navales en distintas localizaciones del litoral gallego. Un año más tarde, se construyó el primer edificio militar en la villa de Marín; lo que hoy día se conoce como la planta baja de del edificio que rodea al patio de aulas. El edificio comenzó con la misión de instruir y adiestrar al personal de los buques de guerra, más tarde a principios del siglo XX constituyó el Polígono de Tiro Naval siendo un centro especializado en la adecuada formación del personal de artillería de la Armada.

No fue hasta 1938 cuando se autorizó la construcción de la Escuela Naval Militar en Marín sustituyendo el Polígono de Tiro Naval. En julio de 1943 se completó el traslado desde su antigua ubicación en San Fernando (Cádiz). Desde entonces se han sucedido numerosas mejoras en cada uno de los edificios que conforman la ENM en Marín, el edificio que rodea en el patio de aulas (Figura 3-20) donde se encuentra la figura de D. Álvaro de Bazán siendo el más antiguo registrado de todo el centro es el motivo de estudio de este trabajo de fin de grado, con los distintos casos expuestos.

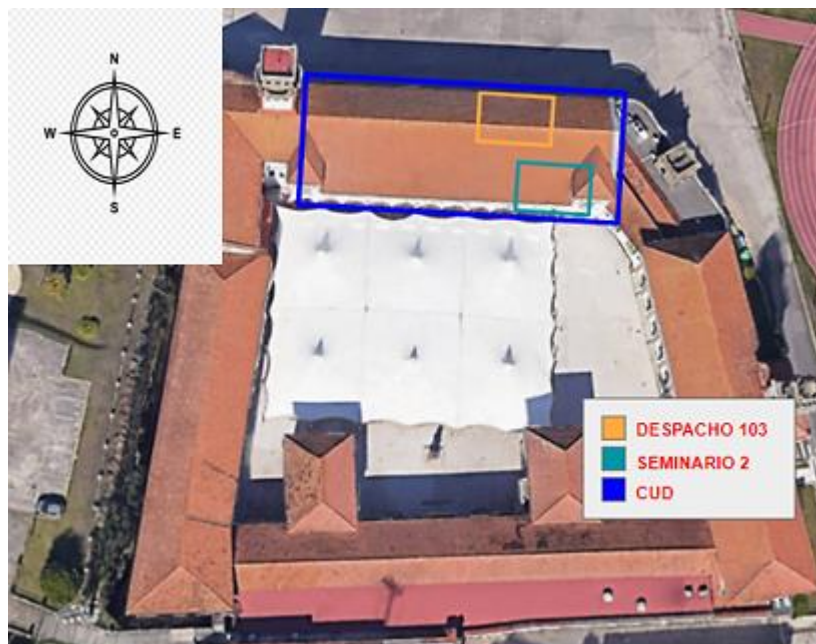


Figura 3-20 Edificio del CUD rodeando el patio de aulas, marcando los casos de estudios analizados [Autoría propia].

La envolvente del edificio

En general las fachadas del edificio del CUD de la primera planta están constituidas de ladrillo hueco de 40 cm de espesor y la planta baja de 60 cm de espesor mínimo de mampostería siendo el grosor total del despacho 103 de 75 cm y de 25 cm del seminario 2. Estas se encuentran enfoscadas y pintadas exteriormente, y equipadas de yeso en su interior para cumplir con las condiciones impuestas de aislamiento térmico y acústico que se exige. A continuación se presenta la composición completa de la zona estudiada de la envolvente del edificio en Tabla 3-4 y Tabla 3-5.

MATERIAL	GROSOR	GROSOR TOTAL
Acrílicos	0,1 cm	
Yeso laminar	1,5 cm	
Lana Mineral	1,5 cm	
Yeso laminar	1,5 cm	75 cm
Cámara de aire	-	
Ladrillo hueco	68,9 cm	
Encachado	1,5 cm	

Tabla 3-4 Materiales de la fachada despacho 103 establecidos por capas [Autoría propia].

MATERIAL	GROSOR	GROSOR TOTAL
Acrílicos	0,1 cm	
Yeso laminar	1,5 cm	
Lana Miner	1,5 cm	
Yeso laminar	1,5 cm	25 cm
Cámara de aire	-	
Ladrillo hueco	18,9 cm	
Encachado	1,5 cm	

Tabla 3-5 Materiales de la fachada seminario 2 establecidos por capas [Autoría propia].

3.5.1 Casos estudiados

Se han estudiado dos habitaciones diferentes del edificio principal del Centro Universitario de Defensa (CUD) que se encuentran en total oposición en cuanto a su localización y orientación con el fin de estudiar ambos extremos de la transmitancia térmica de la envolvente del edificio.

Primero, se realizaron inspecciones cualitativas mediante IRT en ambos casos de estudio. No se detectaron anomalías. Estas inspecciones ayudaron en la decisión de qué área de la pared debía ser analizada.

Despacho 103 caso A

El primer caso de estudio se centra en la medición y toma de valores de la pared norte del despacho 103 Ubicado en la primera planta del CUD. Se utilizaron ambas cámaras termográficas separadas de la pared con una distancia de 4 metros; en dos días distintos del mes de enero (días 23 y 30 del mes) con condiciones meteorológicas contrastantes (el primero sin haber sido el orto solar y condiciones secas, y el segundo en condiciones húmedas debido a una llovizna previa durante la noche); con el objetivo de analizar el comportamiento térmico de la zona estudiada en diferentes situaciones ambientales, saliendo de los criterios óptimos establecidos en apartados previos, con el fin de analizar la robustez de la metodología en condiciones más desfavorables.

La pared norte del despacho es un elemento crucial a estudiar en la envolvente del edificio ya que ésta se encuentra expuesta directamente a la dársena de la Escuela Naval Militar que da acceso a la ría de Pontevedra. Como se ha visto, el edificio del CUD tiene una composición heterogénea de materiales que pueden variar desde hormigón hasta acero y vidrio, cada uno con sus propiedades térmicas propias y capacidad de respuesta a los cambios de la temperatura exterior.

Durante las mediciones con las cámaras termográficas; al igual que en el caso B (seminario 2), se selecciona una zona de interés homogéneo para obtener luego *U-values* representativos. A continuación, se muestra una imagen del día 23 de enero donde se comenzó con la toma de datos de la pared mencionada con las siguientes características de la zona estudiada (ver Tabla 3-6, Figura 3-21 y Figura 3-22).

FACTORES	VALOR
Emisividad (-)	0,9
Distancia (m)	4
Temperatura reflejada (°C)	22

Tabla 3-6 Características área de la pared seleccionada [Autoría propia].

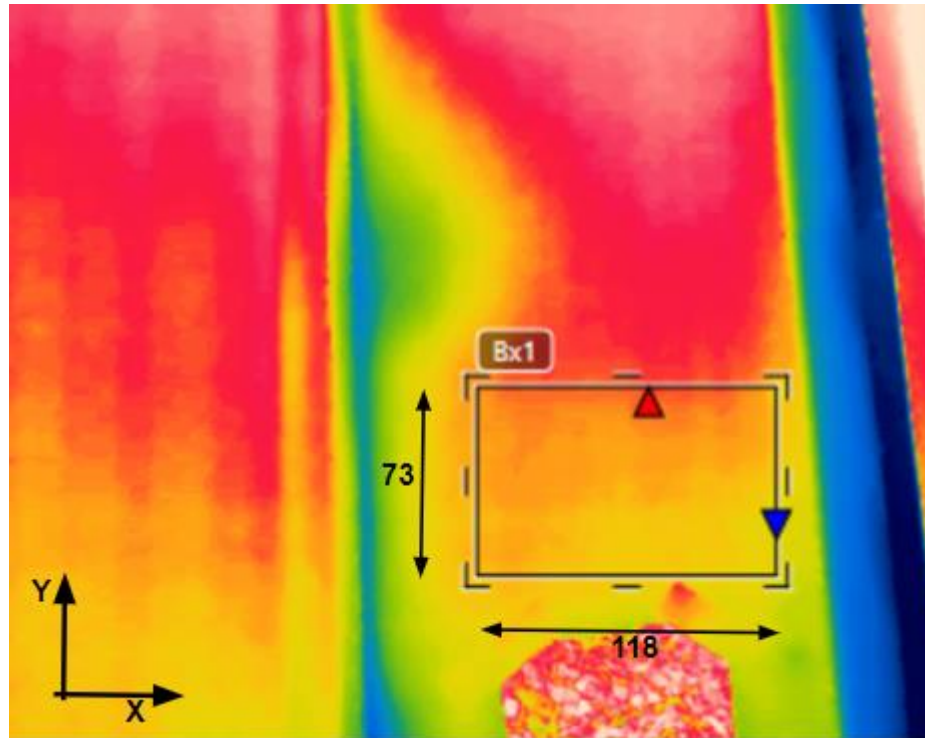


Figura 3-21 Zona de interés del caso A (los números indican dimensión en píxeles) [Autoría propia].

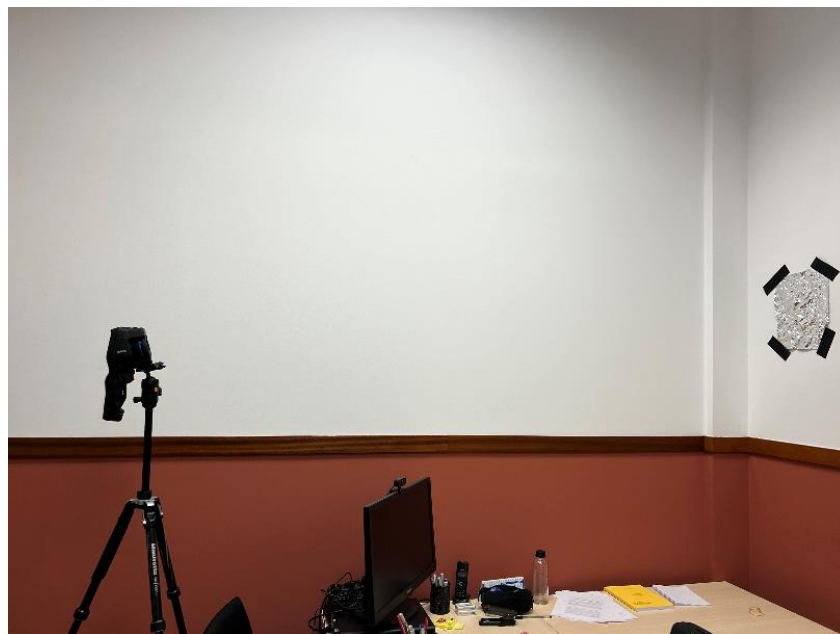


Figura 3-22 Despacho 103 el 23 de enero de 2024 durante el primer análisis térmico [Autoría propia].

Seminario 2 caso B

El segundo caso de estudio se centró en el seminario situado en oposición al despacho 103, seleccionando la pared constituyente de la envolvente del edificio que da salida al patio de aulas de la Escuela Naval Militar. El día que se realizaron las mediciones contaba con unas condiciones cuasi primaverales con un Sol radiante que incidía directamente en la pared estudiada. Además de las fluctuaciones térmicas ocasionadas por el calor solar, se tuvo en cuenta especialmente en la orientación de dicha fachada. La pared del primer caso al estar orientada hacia el norte; se buscó una para el segundo caso que fuese totalmente contraria a ésta. La elección del Seminario 2 del CUD fue debido a su orientación completamente sur.

A continuación se muestra el área seleccionada de la pared estudiada con las características de esta (Figura 3-23, Figura 3-24 y Tabla 3-7).

FACTORES	VALORES
Emisividad (-)	0,9
Distancia (m)	4
Temperatura reflejada (°C)	21

Tabla 3-7 Características área de la pared seleccionada [Autoría propia].

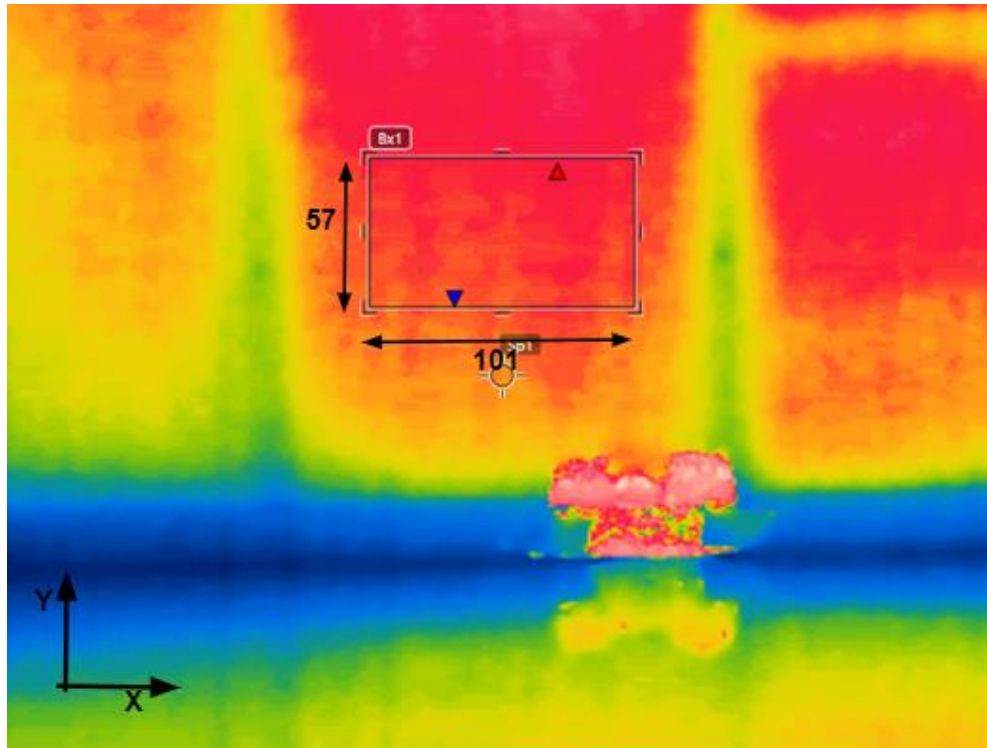


Figura 3-23 Área seleccionada caso B (los números indican dimensión en píxeles) [Autoría propia].

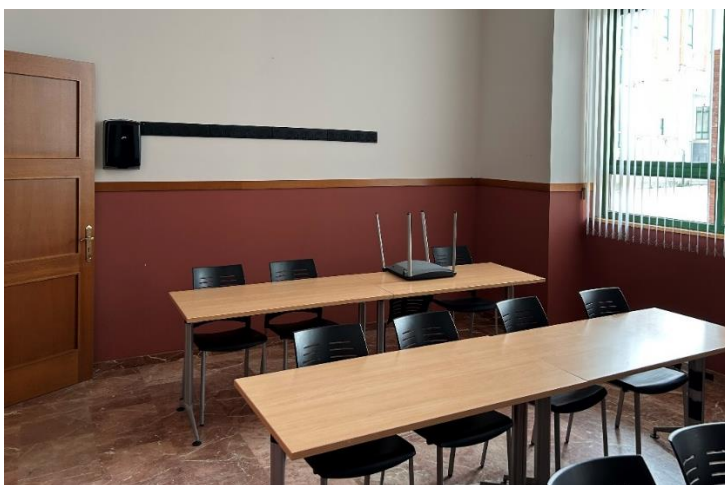


Figura 3-24 Seminario 2 el 13 de febrero de 2024 durante el tercero análisis térmico [Autoría propia].

4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 *U-value* teórica

Caso A valores teóricos

Se han calculado las resistencias térmicas (R ($\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$)) de cada material que constituye la pared estudiada en el despacho 103 que conforma la envolvente del CUD con orientación norte (Tabla 4-1).

MATERIAL	e (m)	λ ($\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$)	R ($\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$)
Acrílicos	0,001	0,2	0,005
Yeso laminar	0,015	0,25	0,06
Lana mineral	0,015	0,04	0,375
Yeso laminar	0,015	0,25	0,06
Cámara de aire	-	0	0
Ladrillo hueco	0,689	0,32	2,153125
Encachado	0,015	2,15	0,0069767

Tabla 4-1 Cálculo de resistencias térmicas de las capas del despacho 103 [Autoría propia].

A continuación se obtuvo la R_t del conjunto de la fachada, añadiendo al cálculo las distintas resistencias térmicas superficiales. Siendo ambos valores: $R_{si} = 0,1300 \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$; $R_{se} = 0,0400 \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$.

$$R_t = 2,8301 \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}.$$

Siguiendo con la ecuación de la *U-value* teórica se obtuvo el siguiente valor:

$$U\text{-value}_{th} = 0,3533 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}).$$

Caso B valores teóricos

Al igual que con el primer caso estudiado; la única diferencia apreciable en el cálculo de la $U\text{-value}_{th}$ es, conforme la Tabla 4-1, el espesor del ladrillo hueco que conforma la pared; siendo este de 0,0189 m. La R_t en este caso tendría un valor de $1,2676 \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$. En consecuencia, la transmitancia térmica de la envolvente del seminario 2 es la siguiente:

$$U\text{-value}_{th} = 0,7889 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}).$$

4.2 *U-Value* obtenidas con la FLIR E85

Caso A valores obtenidos

A continuación se muestra las temperaturas interiores y exteriores obtenidas con los dos sensores iButtons utilizados durante el día 23 de enero de 2024. Se observa una temperatura constante (Figura

4-1) en el interior del despacho frente a un ligero aumento de la temperatura exterior (Figura 4-2) a medida que transcurre la medición con la cámara. Entre ambas temperaturas hay una diferencia de aproximadamente de 7/8 °C, y no de 10-15 °C como condición que se debería seguir según las directrices recomendadas (ver apartados previos). De este modo, de nuevo, se analiza en este trabajo la metodología en condiciones más desfavorables.

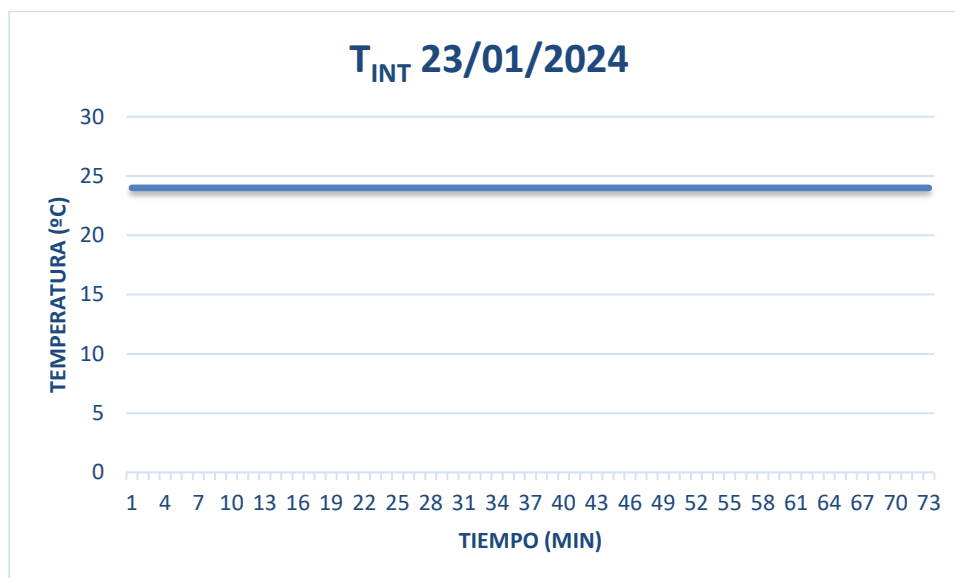


Figura 4-1 Temperatura interior 23 de enero de 2024 tomada por el sensor iButton en el interior del despacho [Autoría propia].

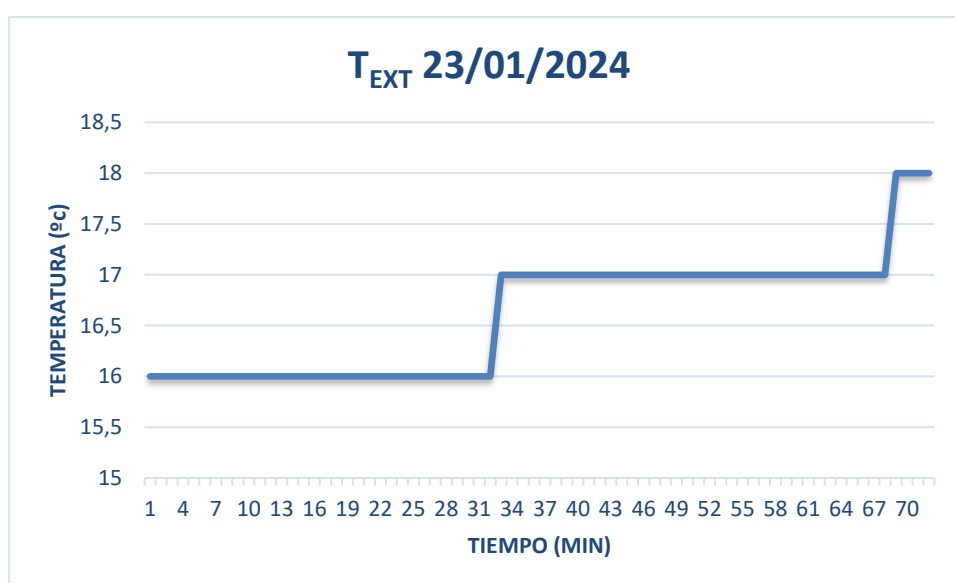


Figura 4-2 Temperatura exterior 23 de enero de 2024 tomada por el sensor iButton en el exterior del despacho [Autoría propia].

El análisis de datos comenzó a las 08:58 h de la mañana y terminó el mismo día a las 10:09 h de la mañana. La Figura 4-3 muestra una representación visual de las temperaturas medias registradas por la cámara termográfica minuto a minuto durante el intervalo mencionado anteriormente. En el eje vertical se representa la temperatura en grados Celsius, mientras que en el eje horizontal se muestra el tiempo en minutos. Durante este intervalo, de aproximadamente una hora de estudio, se puede apreciar fluctuaciones en las temperaturas registradas que se deben a diversos factores externos; como por ejemplo la radiación solar o el transcurso del día, con una tendencia ascendente. Por ejemplo, al inicio del intervalo de tiempo, se observa que las temperaturas pueden ser más bajas, ya que la superficie o

estructura aún conserva la temperatura nocturna. A medida que avanza la hora, es probable que las temperaturas comiencen a aumentar gradualmente debido a la influencia del sol y a la calefacción, es decir, el calentamiento diurno y sobre todo a la presencia del sistema de calentamiento interno y al personal usuario del despacho.

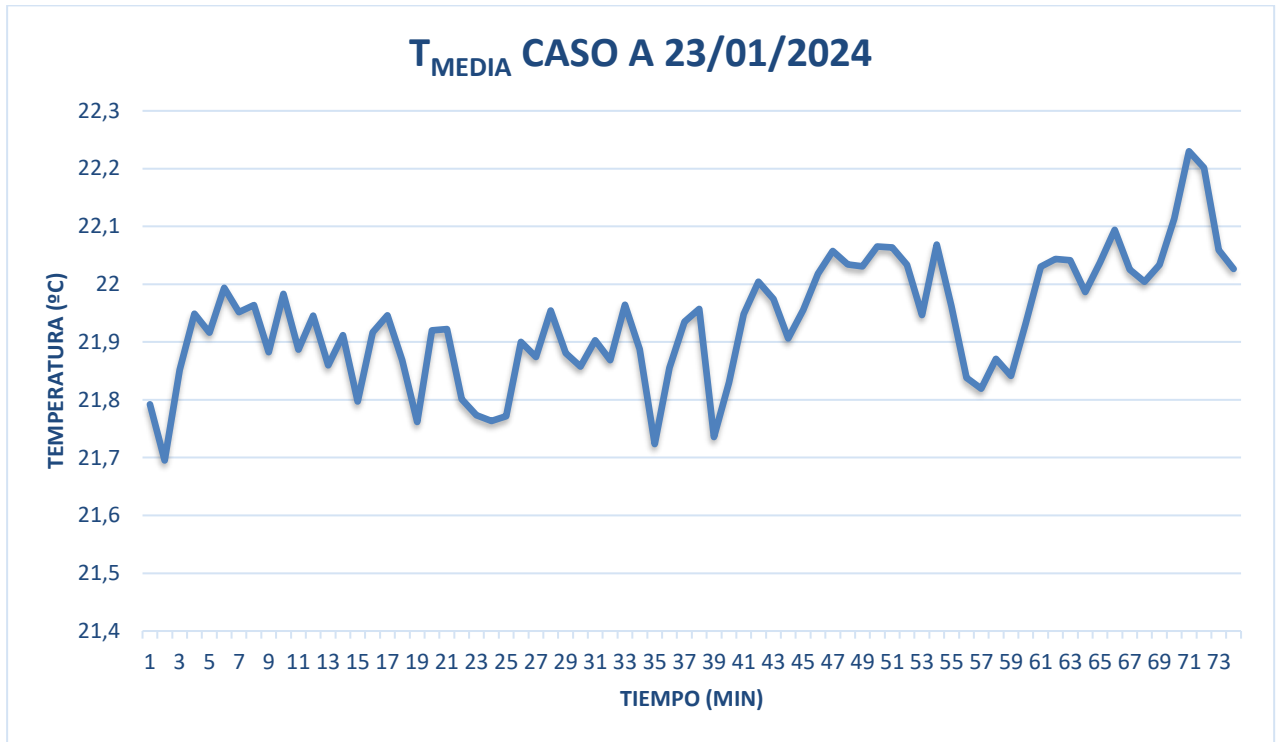


Figura 4-3 T_{media} del caso A el 23 de enero de 2024 [Autoría propia].

Con la media de temperaturas de cada minuto estudiado, se calculó el coeficiente del número de Rayleigh (Ra) (Figura 4-4) y expansión de temperatura volumétrica (β) (Figura 4-5), para posteriormente utilizando el método expuesto anteriormente obtener la transmitancia térmica de la pared minuto a minuto (U -value).

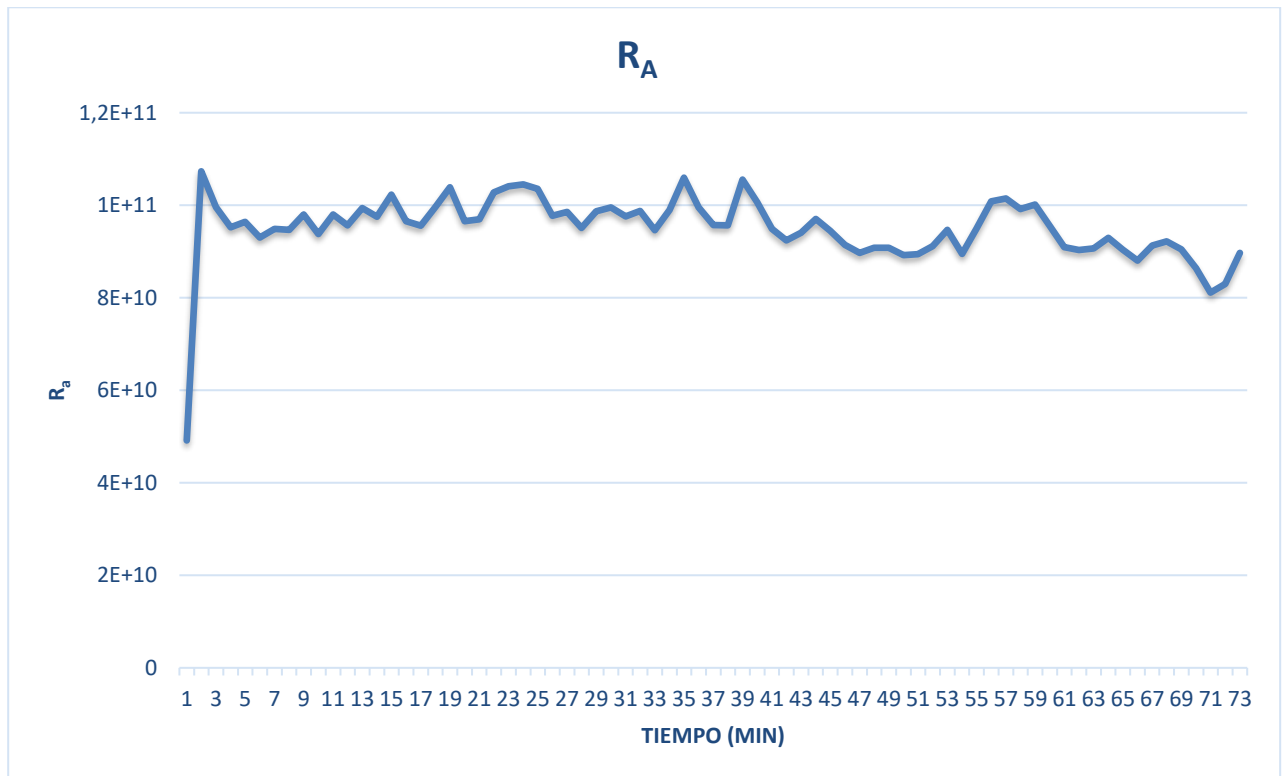


Figura 4-4 R_a del tiempo estudiado caso A el 23 de enero [Autoría propia].

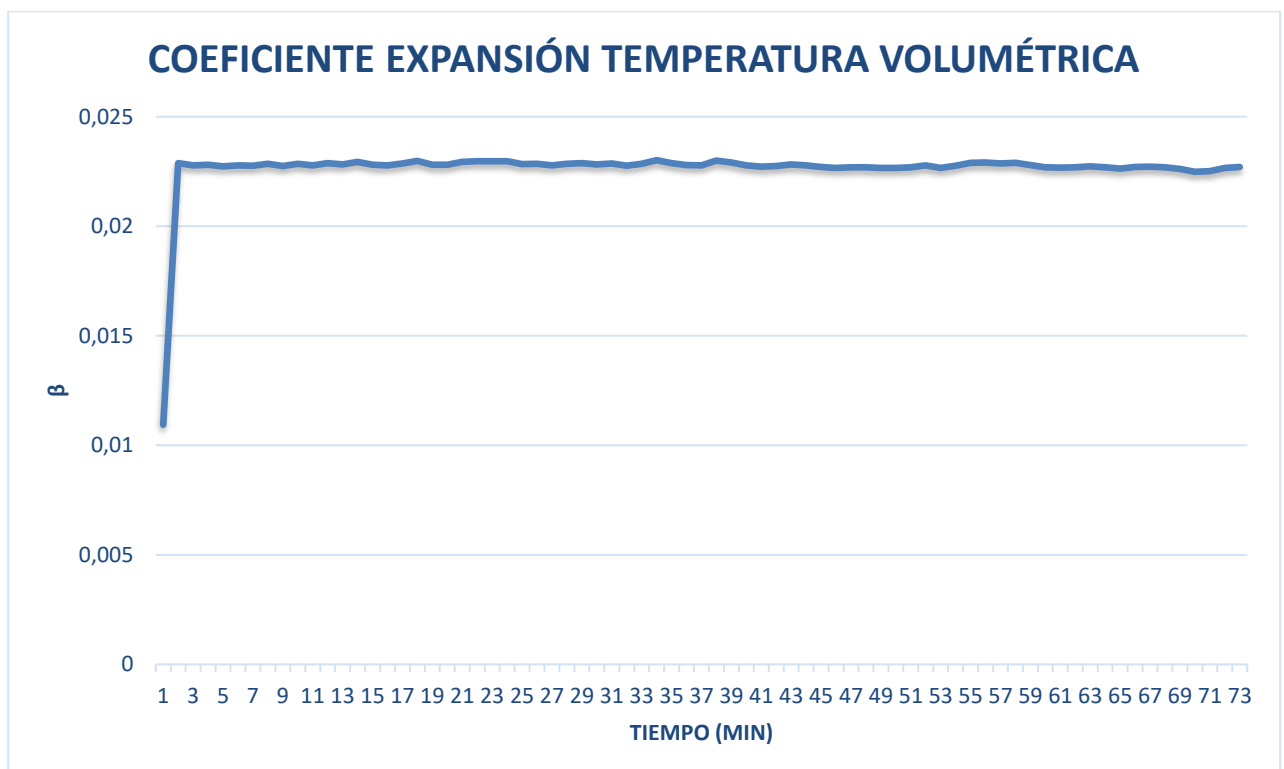


Figura 4-5 Coeficiente expansión temperatura volumétrica (β) del caso A el 23 de enero [Autoría propia].

Se puede observar una U -value (Figura 4-6) que varía entre 1 y 0,7; estabilizándose a medida que se sucede la medición de los datos. Se ha obtenido una U -value de promedio de esta primera medición de $0,9095 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$.

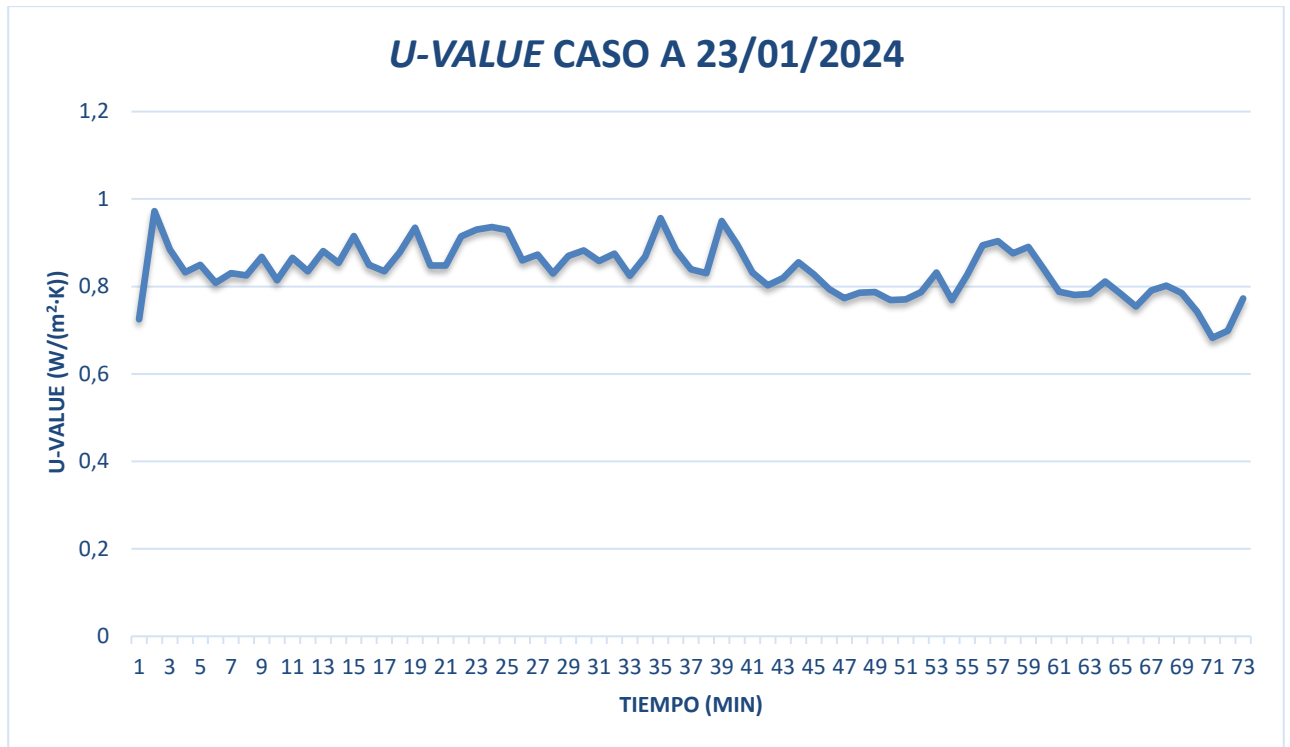


Figura 4-6 U-value caso A el 23 de enero de 2024 [Autoría propia].

Se tomó de nuevo mediciones el 30 de enero de 2024 en la misma zona de la fachada del despacho 103, para detectar posibles variaciones con respecto a los datos tomados el día 23 de enero. Se observó una temperatura interior (Figura 4-7) casi idéntica al primer día de medida, esto es debido a que los sensores iButtons redondean las temperaturas a las unidades despreciando los decimales. En este día, la duración de la toma de datos fue de 34 minutos frente a los 73 minutos del primer día. En cuanto a la temperatura exterior, fue de media entre 1 y 2 °C menos que del día 23 de enero (Figura 4-8).

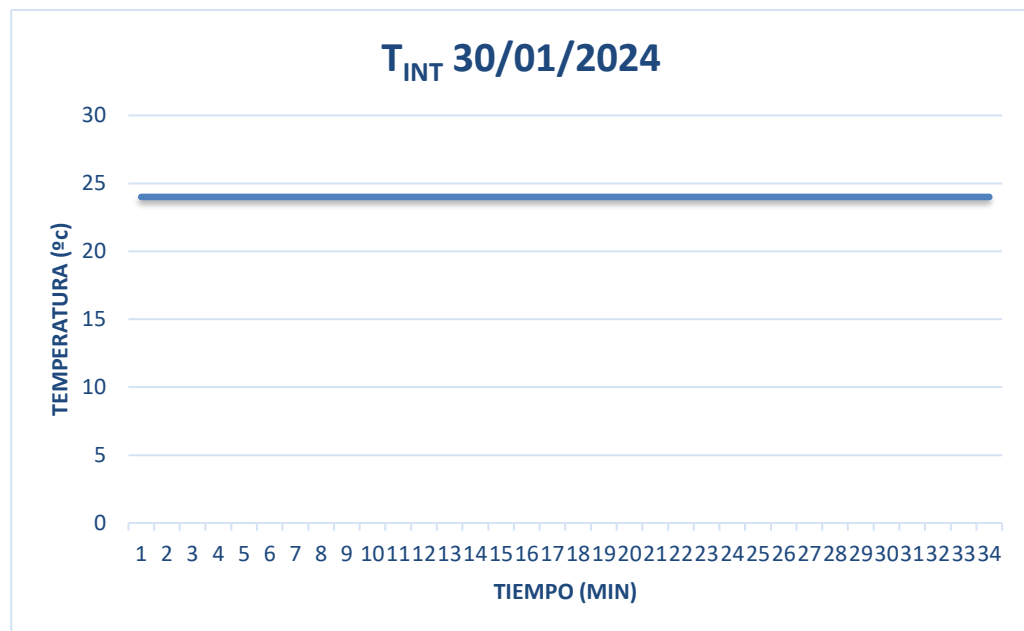


Figura 4-7 Temperatura interior 30 de enero de 2024 tomada por el sensor iButton en el interior del despacho [Autoría propia].

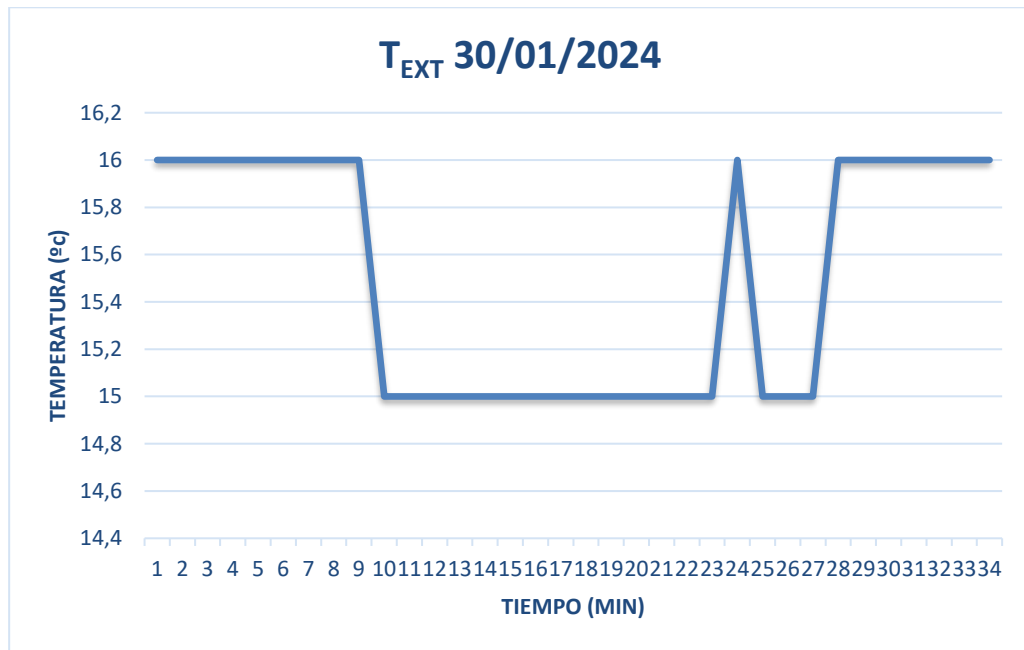


Figura 4-8 Temperatura exterior 30 de enero de 2024 tomada por el sensor iButton en el exterior del despacho [Autoría propia].

En este día, el análisis de datos comenzó más tarde del orto solar, a las 10:24 h de la mañana, por lo que tampoco cumplió con una de las condiciones del método. Con eso, y como se comprueba observando la Figura 4-7 y Figura 4-8, no se aprecia una diferencia de 15 °C entre la temperatura interior y la temperatura exterior, aparte que ese día estaba en condiciones húmedas tal y como se comentó en párrafos previos. Además, la temperatura exterior sufre una pequeña variación a mitad del análisis, que aunque en la etapa final se corrige, muestra la poca fiabilidad que tienen los sensores iButtons utilizados durante este trabajo. Los datos de temperatura tomados con la cámara (Figura 4-9), se han promediado para cada minuto analizado durante esta media hora de análisis. Los resultados han sido los siguientes:

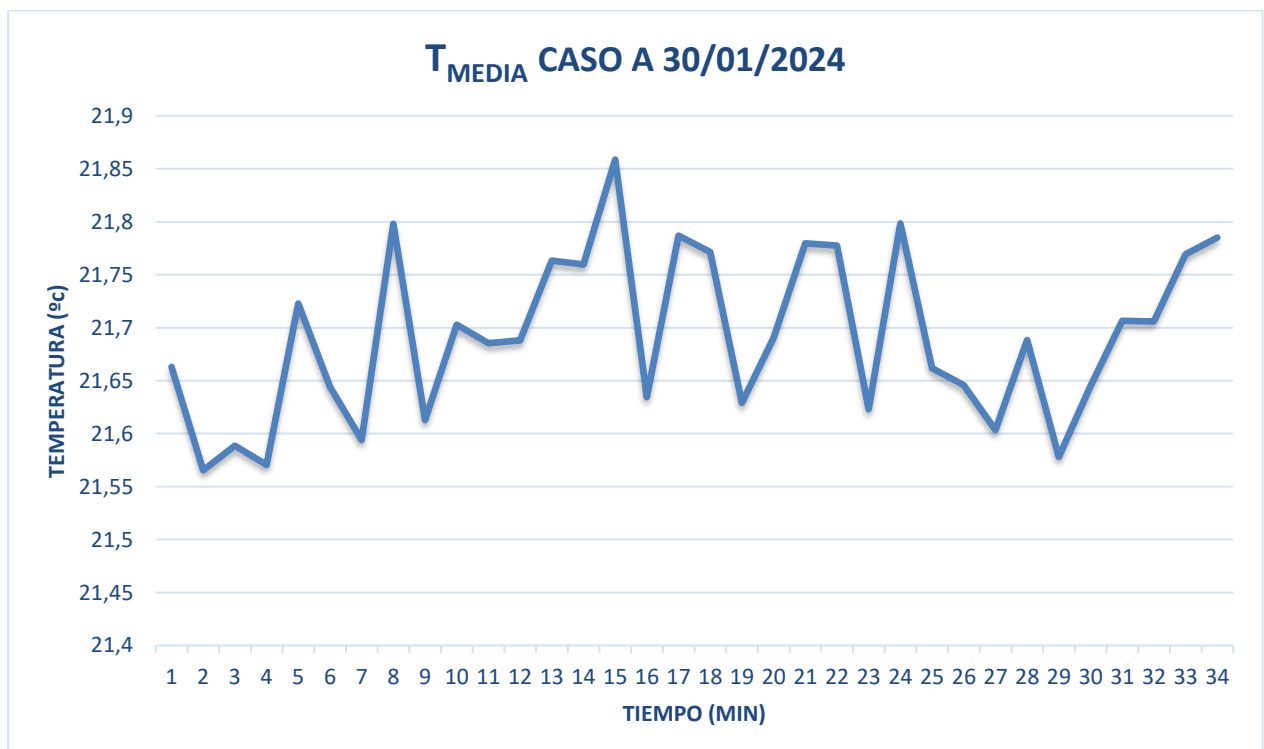


Figura 4-9 T_{media} del caso A el 30 de enero de 2024 [Autoría propia].

Con la media de temperaturas calculadas de cada minuto estudiado, se calculó el número de Rayleigh (R_a) (Figura 4-10) y el coeficiente de expansión de temperatura volumétrica (β) (Figura 4-11) para posteriormente utilizando el método expuesto anteriormente obtener la transmitancia térmica de la pared minuto a minuto (Figura 4-12).

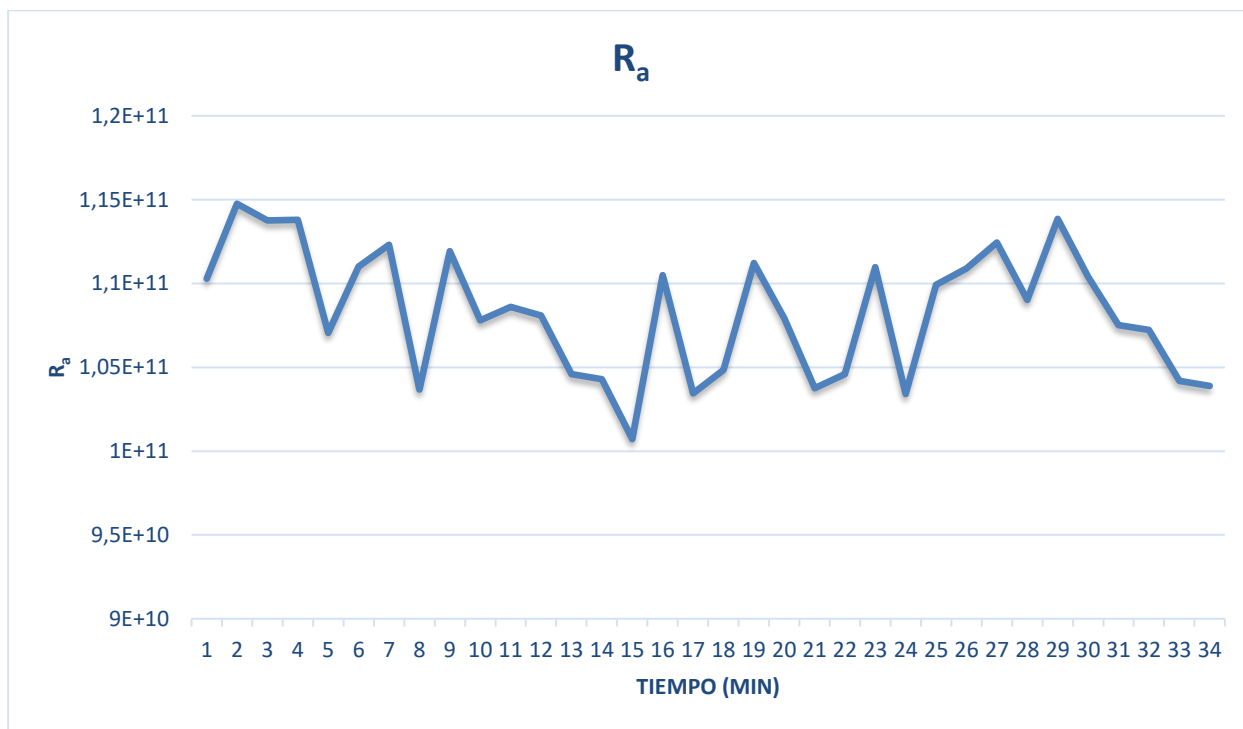


Figura 4-10 R_a del tiempo estudiado caso A el 30 de enero [Autoría propia].

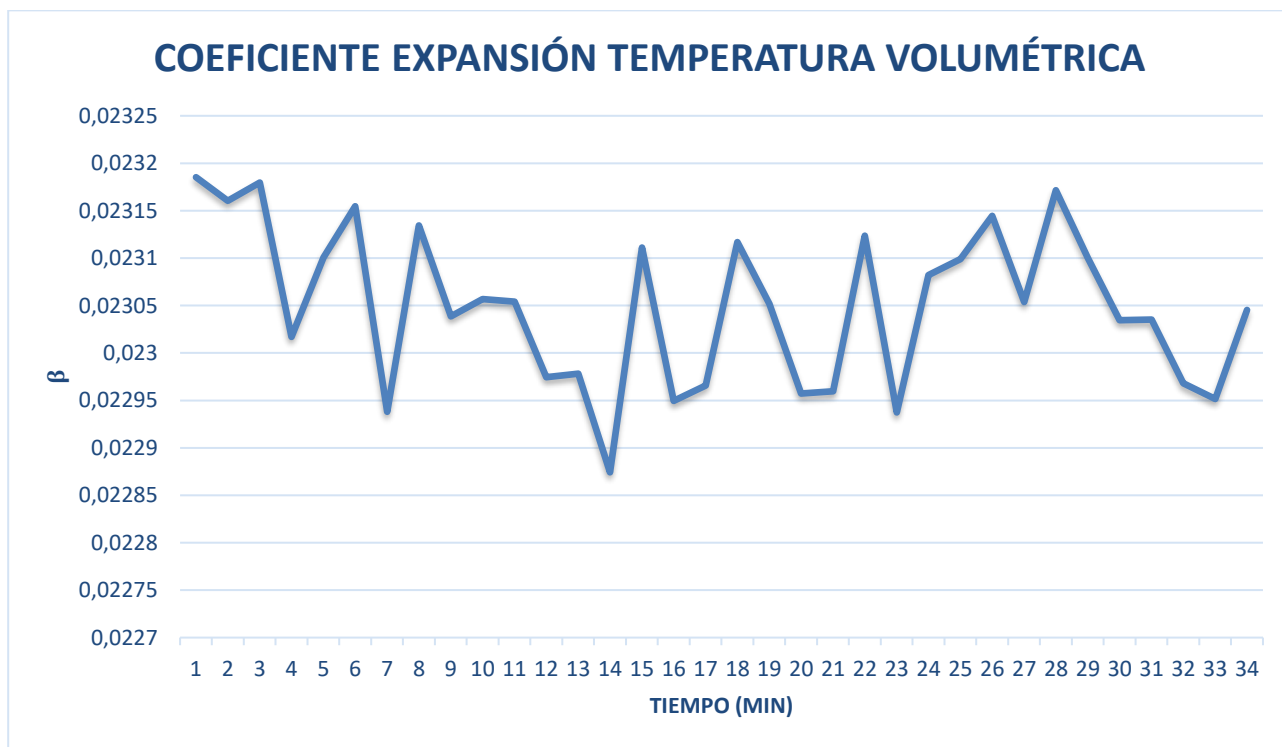


Figura 4-11 Coeficiente expansión temperatura volumétrica (β) del caso A el 30 de enero [Autoría propia].

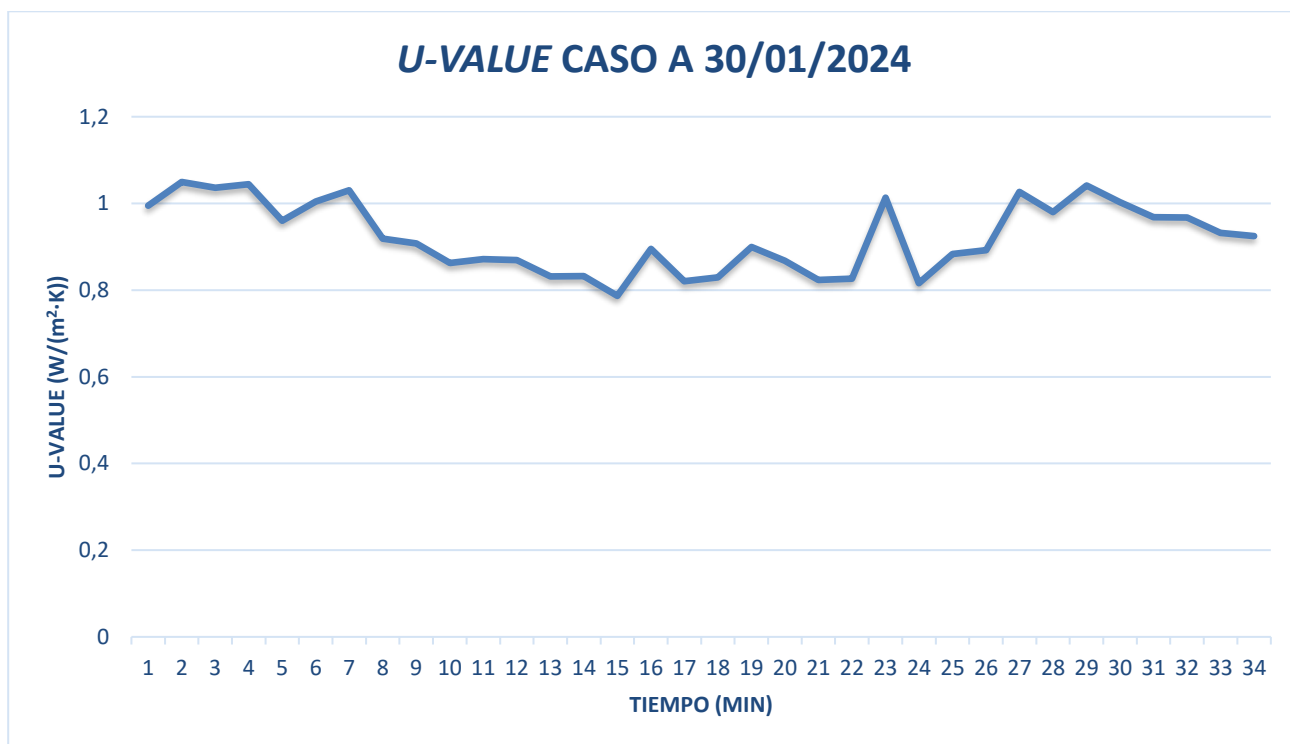


Figura 4-12 U-value caso A el 30 de enero de 2024 [Autoría propia].

Se puede observar que el *U-value* (Figura 4-12) varía entre 1,1 y 0,78; manteniendo unos datos constantes. Aunque el tiempo de medición ha sido la mitad que la del primer día, se aprecia una tendencia de valores más constante que el día anterior de medida. Se ha obtenido una *U-value* promedio de esta segunda toma de datos de 0,9252 W/(m²·K), muy semejante al día 23 de enero (0,9095 W/(m²·K)), demostrando una alta repetibilidad con esta metodología propuesta. Específicamente, se observa un ligero incremento de la transmitancia térmica de casi el 4% con respecto al 23 de enero; esto es debido a diversas causas, entre las que se destaca la poca exactitud y precisión de las medidas por parte de los sensores iButtons, y las diferentes condiciones meteorológicas de los dos días de medición.

Caso B valores obtenidos

La toma de datos de temperatura con la cámara termográfica en el caso B, materializado como el seminario 2 del edificio del CUD, se dio el 13 de febrero de 2024 a primera hora de la tarde a las 14:54 h con una duración de 35 minutos. Esto ha hecho que no se cumpla con una de las condiciones impuestas más determinantes; la del análisis de la fachada en un arco nocturno previo al orto solar o posterior a su ocaso. Debido a esto, la diferencia de temperatura entre el interior y el exterior del edificio es apenas apreciable con una variación máxima de 2 °C entre ambas; siendo muy distante a la impuesta como condición para el uso exitoso del método utilizado de una variación mínima de 10 °C y máxima de 15 °C. De todas formas, se pretende con esto evaluar la metodología en condiciones más desfavorables. Nuevamente, al igual que en el caso A, se puede observar varias fluctuaciones en poco tiempo, sobre todo en la temperatura exterior (Figura 4-13). Esto es debido a la incidencia intermitente del Sol en el sensor iButton, colocado en el patio de aulas, ya que el 13 de febrero fue un día parcialmente nublado donde el Sol se ocultaba en intervalos cortos de tiempo durante todo el transcurso del día. Esto también hizo fluctuar en mayor medida a la temperatura interior media (Figura 4-14).



Figura 4-13 Temperatura exterior 13 de febrero de 2024 tomada por el sensor iButton en el exterior del seminario 2 [Autoría propia].

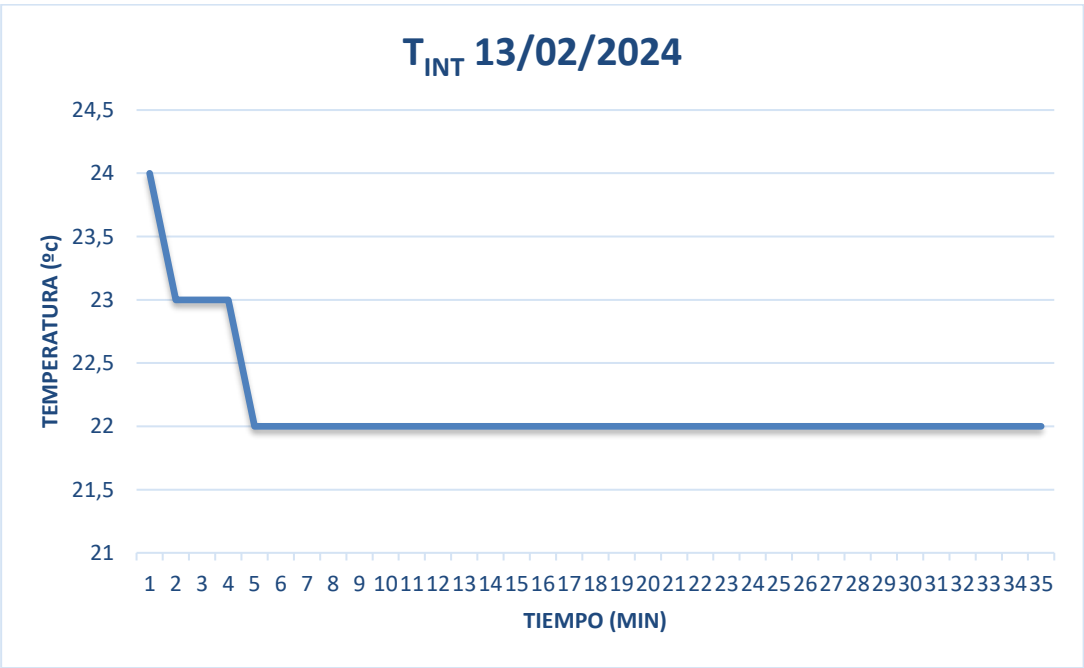


Figura 4-14 Temperatura interior 13 de febrero de 2024 tomada por el sensor iButton en el interior del seminario 2 [Autoría propia].

Los datos de temperatura tomados con la cámara se han promediado para cada minuto analizado durante esta media hora de análisis. Los resultados han sido los siguientes:

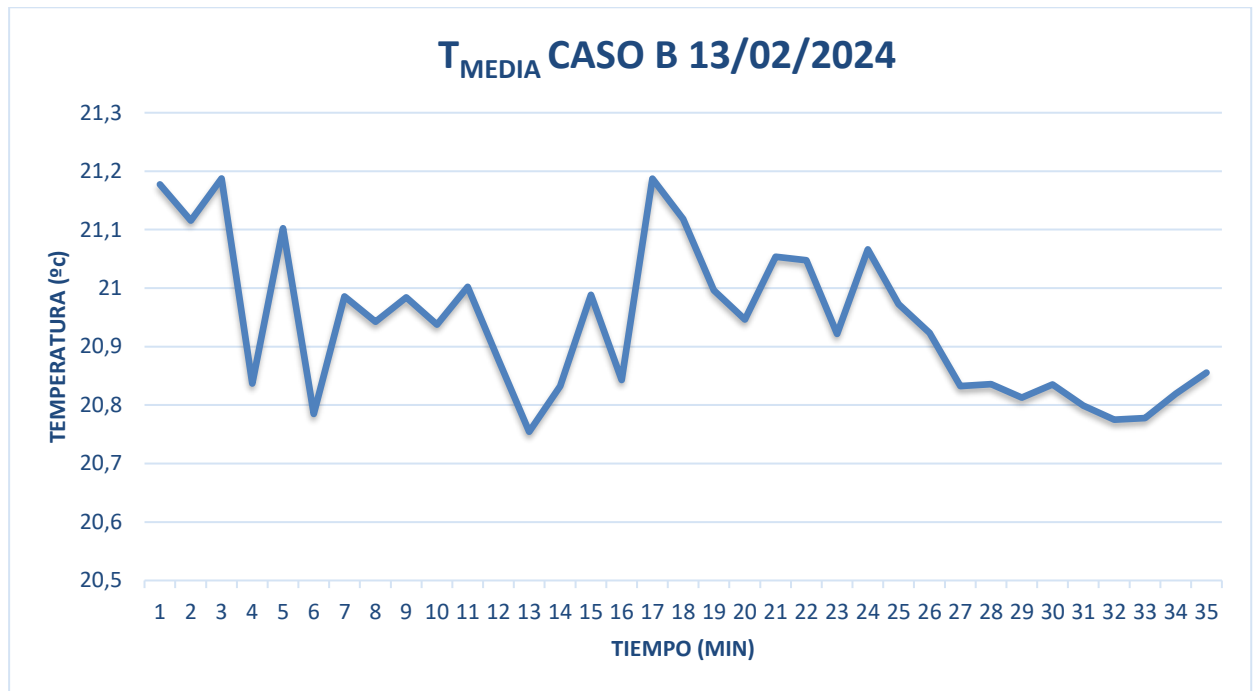


Figura 4-15 T_{media} del caso B el 13 de febrero de 2024 [Autoría propia].

Con la media de temperaturas calculadas de cada minuto estudiado, se calculó el número de Rayleigh (Ra) (Figura 4-16) y el coeficiente de expansión de temperatura volumétrica (β) (Figura 4-17), para posteriormente utilizar el método expuesto anteriormente obtener la transmitancia térmica de la pared minuto a minuto (Figura 4-18).

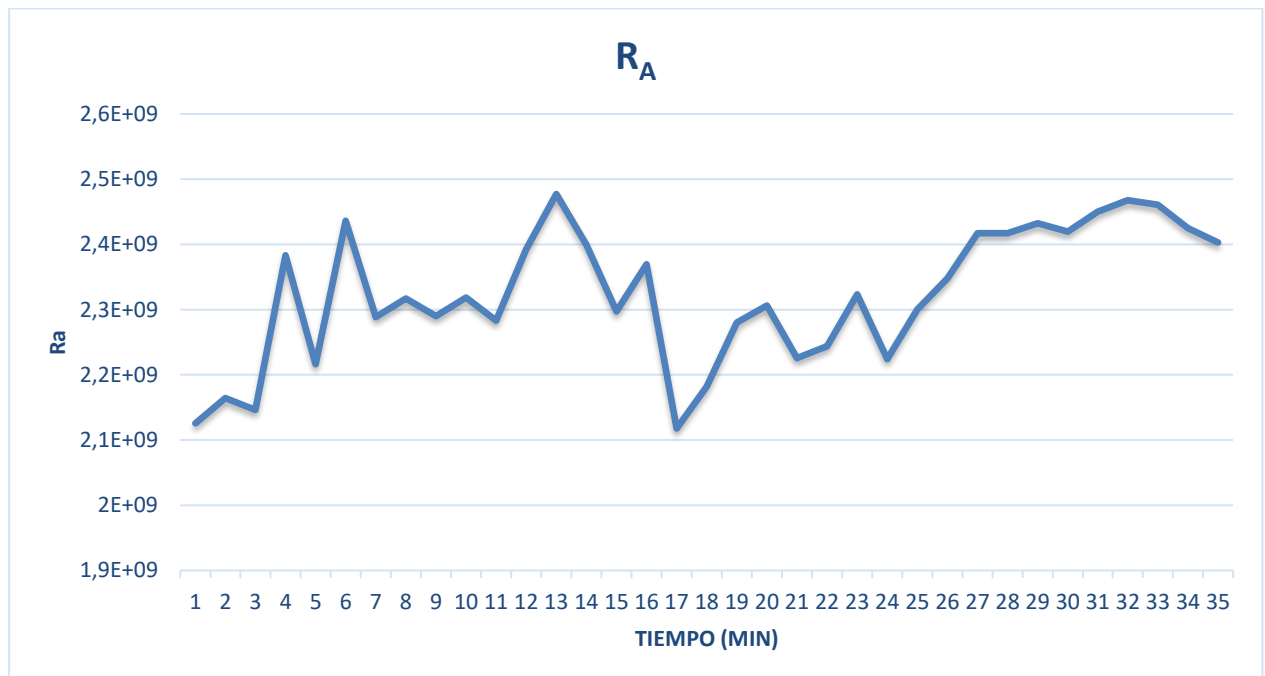


Figura 4-16 Ra del tiempo estudiado caso B el 13 de febrero [Autoría propia].

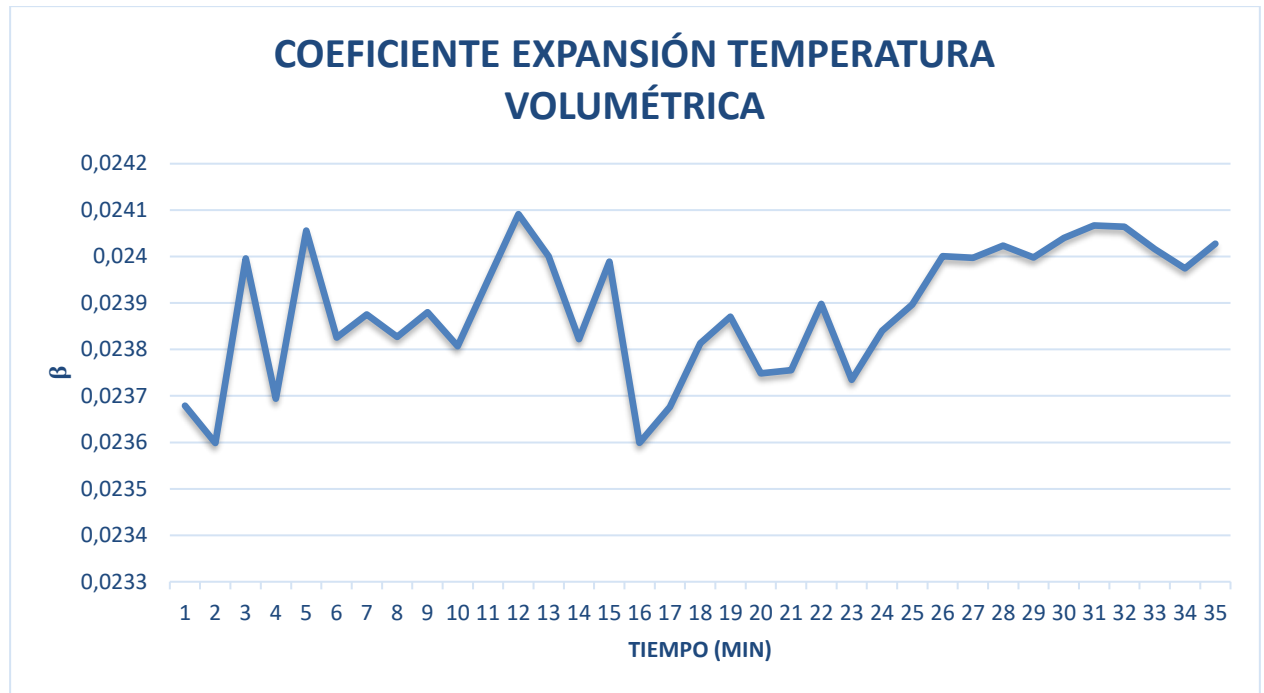


Figura 4-17 Coeficiente expansión temperatura volumétrica (β) del caso B el 13 de febrero [Autoría propia].

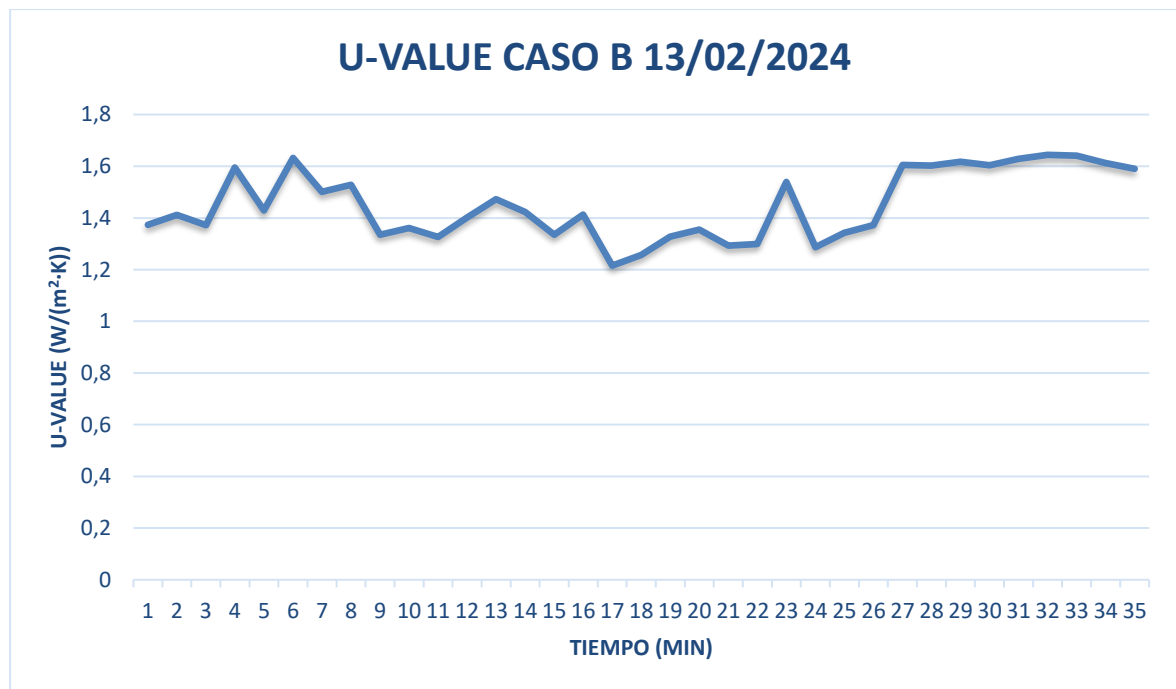


Figura 4-18 U-value caso B el 13 de febrero de 2024 [Autoría propia].

Se puede observar una U -value (Figura 4-18) que varía entre los valores 1,2 y 1,65; manteniendo unos datos con una tendencia constante con un tiempo de medición de poco más de media hora, y en el epicentro del arco diurno, a pesar de no ser en condiciones favorables el momento de estudio. Se ha obtenido una U -value promedio de este segundo caso de $1,4497 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$.

4.3 Comparación U -value teórica con U -value medida con la FLIR E85

Caso A comparación

Siendo $U\text{-value}_{th} = 0,3533 \text{ (W/(m}^2\cdot\text{K))}$, el promedio del día 23 de enero de 2024 de $U\text{-value}_{mes} = 0,8732 \text{ (W/(m}^2\cdot\text{K))}$, y el del día 30 de enero de $U\text{-value}_{mes} = 0,9253 \text{ (W/(m}^2\cdot\text{K))}$; se observa en la Figura

4-19 una diferencia bastante significativa entre los valores medidos y el valor teórico de la fachada norte del despacho 103. La transmitancia térmica medida del primer día de estudio se incrementó un 147,13 % con respecto a la teórica. En cuanto al segundo día de estudio, el U -value varió un 161,83 % con respecto a la teórica. En definitiva, se ha incrementado en un 154,49 % con respecto a la U -value_{th}. (Figura 4-19 y Figura 4-20).

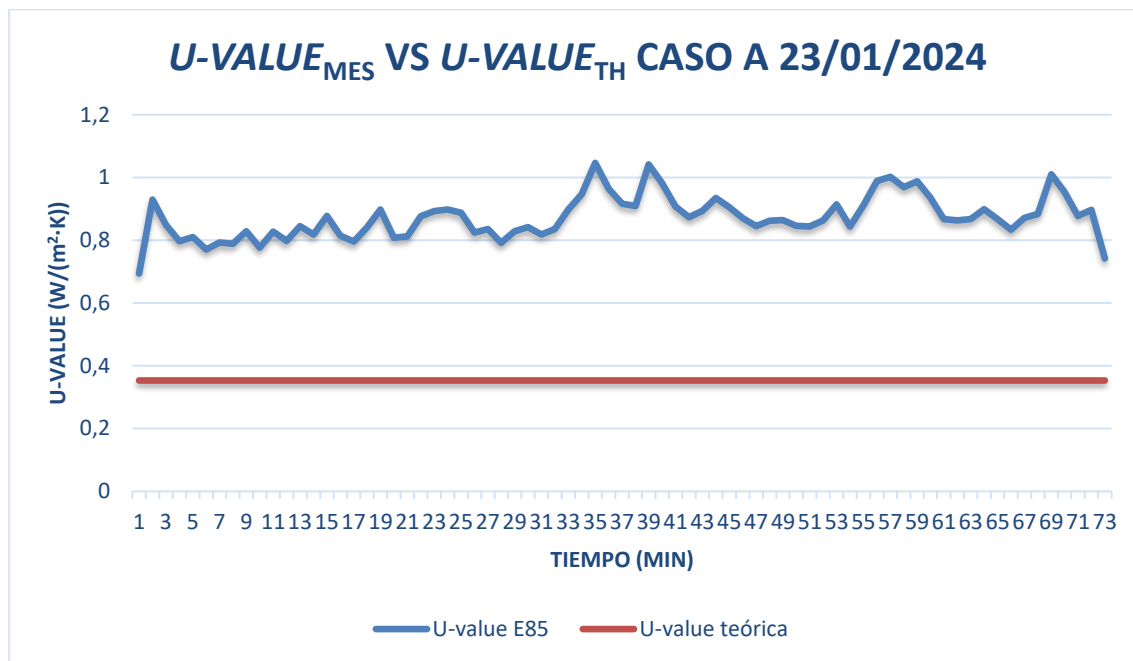


Figura 4-19 Comparación U -value_{mes} con U -value_{th} en caso A el 23 de enero de 2024 [Autoría propia].

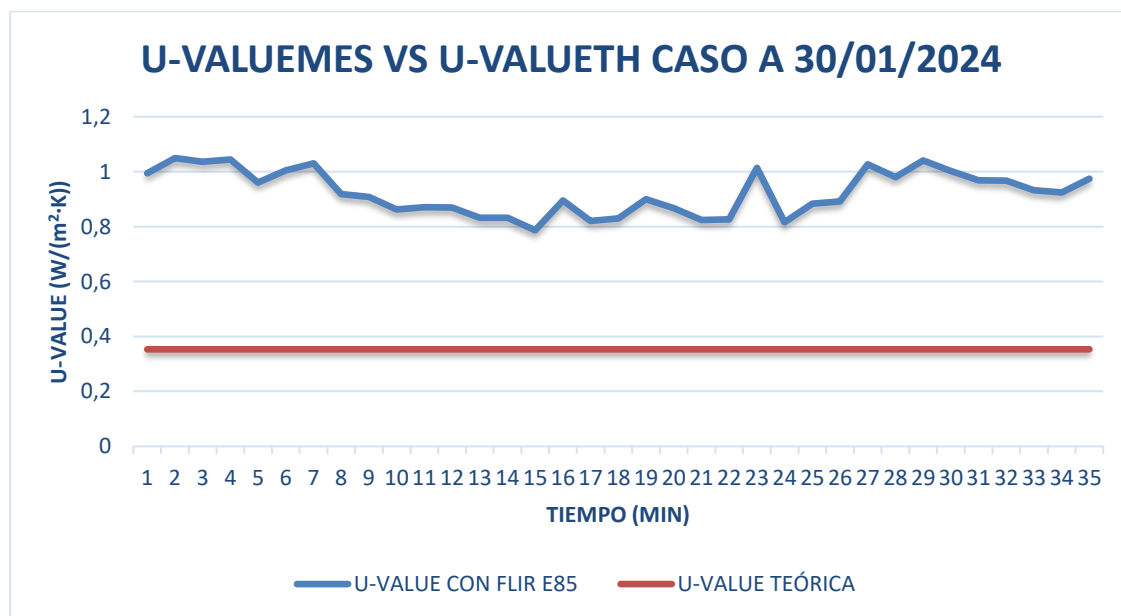


Figura 4-20 Comparación U -value_{mes} con U -value_{th} en caso A el 30 de enero de 2024 [Autoría propia].

Caso B comparación

Se aprecia una gran diferencia, aunque menor respecto al caso A, entre ambas U -value (Figura 4-21). Siendo U -value_{th} = 0,7889 (W/(m²·K)), y el promedio del día 13 de febrero de 2024 de U -value_{mes} = 1,4498 (W/(m²·K)); se observa una variación considerable entre el valor medido y el teórico calculado con los datos técnicos de los elementos que componen la fachada del seminario 2 del CUD de la planta

baja del edificio. La transmitancia térmica medida presenta un incremento del 83,78 % con respecto a la teórica.

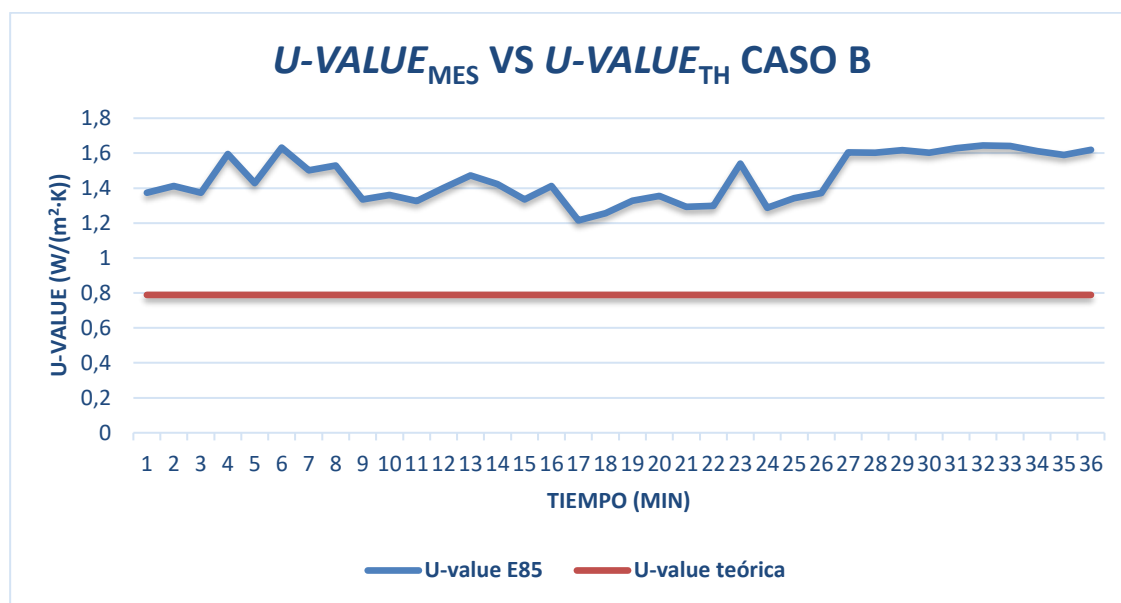


Figura 4-21 Comparación $U\text{-value}_{\text{mes}}$ con $U\text{-value}_{\text{th}}$ en caso B el 13 de febrero de 2024 [Autoría propia].

4.3.1 Causas de la discrepancia

El incremento medio, teniendo en cuenta ambos días, del 154,49 % en el caso A, y del 83,78 % en el caso B, en la diferencia entre la transmitancia térmica medida y la $U\text{-value}$ teórica, se puede atribuir a varios factores, siendo el deterioro de las fachadas con el paso de los años uno de los más significativos. A medida que un edificio envejece, es común que los materiales de construcción que lo conforman se deterioren debido a la exposición a condiciones ambientales adversas, como la radiación solar, la lluvia, el viento y la contaminación atmosférica. Esto concuerda con que se han realizado los análisis en un edificio ubicado en el norte de España, donde hay una humedad mayor y una mayor concentración de precipitaciones con respecto al resto de la Península Ibérica. Este deterioro puede provocar fisuras, grietas o deformaciones en la estructura de las fachadas, lo que aumenta las pérdidas de energía y reduce la eficiencia del aislamiento térmico de la envolvente del CUD.

Por otro lado, la poca precisión de los sensores iButtons utilizados para la toma de temperaturas del interior y del exterior del edificio también puede haber contribuido a la discrepancia observada. Los sensores iButtons pueden tener ciertas limitaciones en términos de precisión y estabilidad a lo largo del tiempo, lo que puede introducir errores en las mediciones. Si los sensores no están correctamente calibrados, o si no se toman medidas para garantizar su correcto funcionamiento, es posible que las lecturas de temperatura no sean totalmente precisas, lo que afectaría a la precisión de los cálculos del $U\text{-value}$.

Además, las condiciones meteorológicas en Marín (Pontevedra), como se ha comentado anteriormente, también pueden haber influido en los resultados. El hecho de que no se pudiera esperar a que no lloviese en los 2-3 días anteriores al día de medición (condición importante del método utilizado), debido a las condiciones climáticas de la ciudad, ha introducido fluctuaciones en las lecturas de temperatura y en las condiciones ambientales durante el período de prueba. La presencia de lluvia puede afectar al comportamiento térmico de los materiales de construcción, y modificar la transferencia de calor a través de las fachadas, lo que podría influir en las mediciones de transmitancia térmica.

Cabe destacar que aunque ambos casos de estudio formen parte del mismo edificio, y por tanto se construyesen en el mismo año, la fachada norte presenta una mayor transmitancia térmica que la sur. Esto es debido a la exposición directa de la envolvente de la cara norte a la ría de Pontevedra, incidiendo en ella y produciendo un mayor deterioro que el caso B.

En conclusión, la discrepancia observada en la diferencia entre la transmitancia térmica medida y la *U-value* teórica puede ser atribuible a una combinación del deterioro de la envolvente del edificio del CUD con el tiempo, la precisión de los sensores utilizados y las condiciones meteorológicas durante las mediciones. Es importante tener en cuenta estos factores al interpretar los resultados, y considerar posibles medidas correctivas o ajustes en el proceso de evaluación de la eficiencia energética del edificio

4.4 Comparación *U-Value* teórica y *U-Value* FLIR E85 con resultados de FLIR OneEdge.

Estableciendo los valores obtenidos con la cámara FLIR E85 de ambos casos estudiados como los *U-value* teóricos de aquellas fachadas, se ha comprobado la variación con respecto a los *U-value* obtenidos a partir de la cámara FLIR OneEdge.

La comparación se ha centrado en el caso A debido a que la fachada estudiada tiene orientación norte como fija el método de referencia. Del primer caso, se ha establecido el primer día de estudio como comparación debido a su extensa duración en el tiempo de medición.

Primeramente, analizando las imágenes tomadas de la zona estudiada por ambas cámaras, se observa una notable diferencia en la calidad de la imagen, que ocasiona confusión a la hora de identificar las zonas de interés de la pared (Figura 4-22). Un ejemplo de esto es, fijándose en la figura de la izquierda perteneciente a la cámara FLIR E85, la claridad con la que se puede visualizar el papel de aluminio de referencia colocado en la estructura. En cambio, atendiendo a la imagen de la derecha, no se identifica con claridad el papel de aluminio reflectante a partir de la FLIR OneEdge.

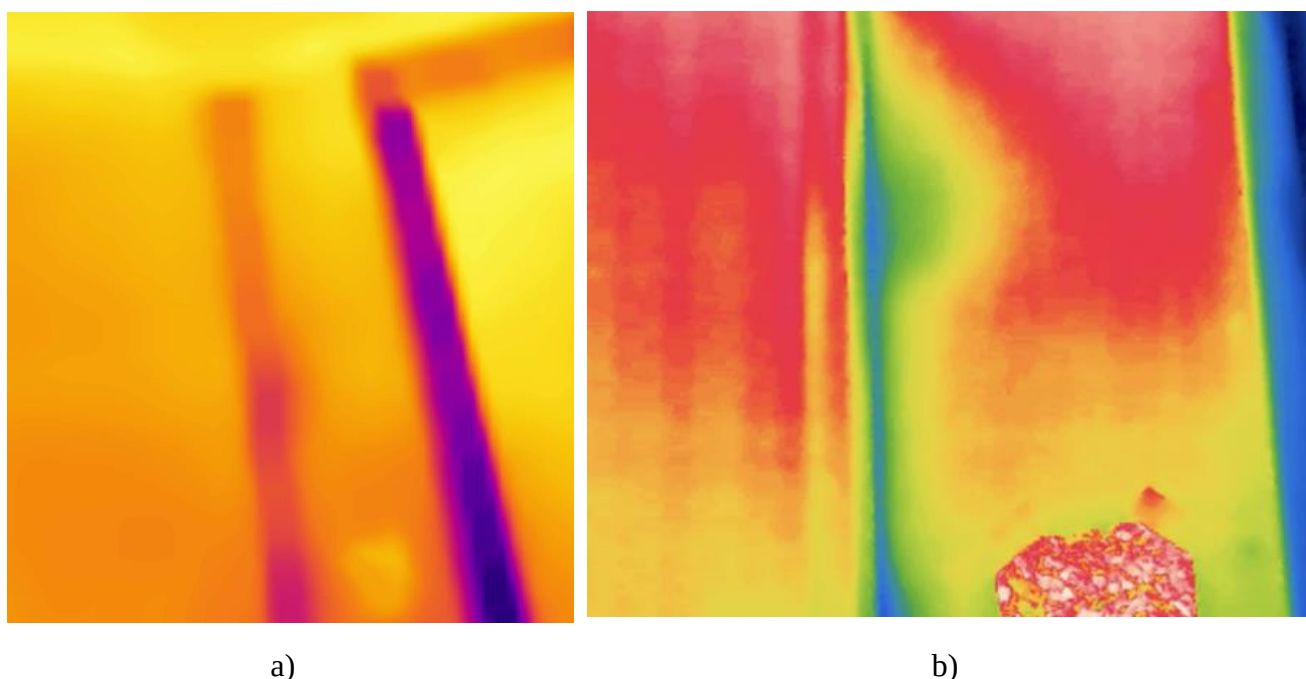


Figura 4-22 a) Zona estudiada el día 30 de enero de 2024 mostrada con la FLIR OneEdge. b) Zona estudiada el día 30 de enero de 2024 mostrada con la FLIR E85 [Autoría propia].

La correlación se ha realizado con los valores medidos del día 30 de enero, para analizar su robustez aplicándolo en otro día de estudio, en este el día 23 de enero. Esto es posible mediante los ejecutables creados y comentados en apartados previos. En la Figura 4-23 y Figura 4-24 se muestra la correlación en el momento inicial y final del día 30 de enero, respectivamente.

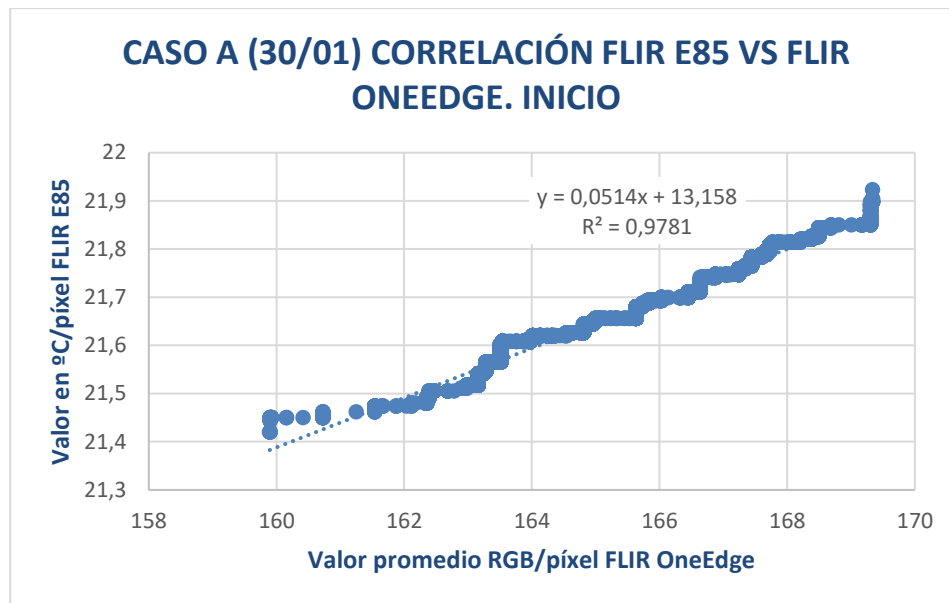


Figura 4-23 Correlación entre la FLIR OneEdge y la FLIR E85 en el momento inicial del caso 30 de enero [Autoría propia].

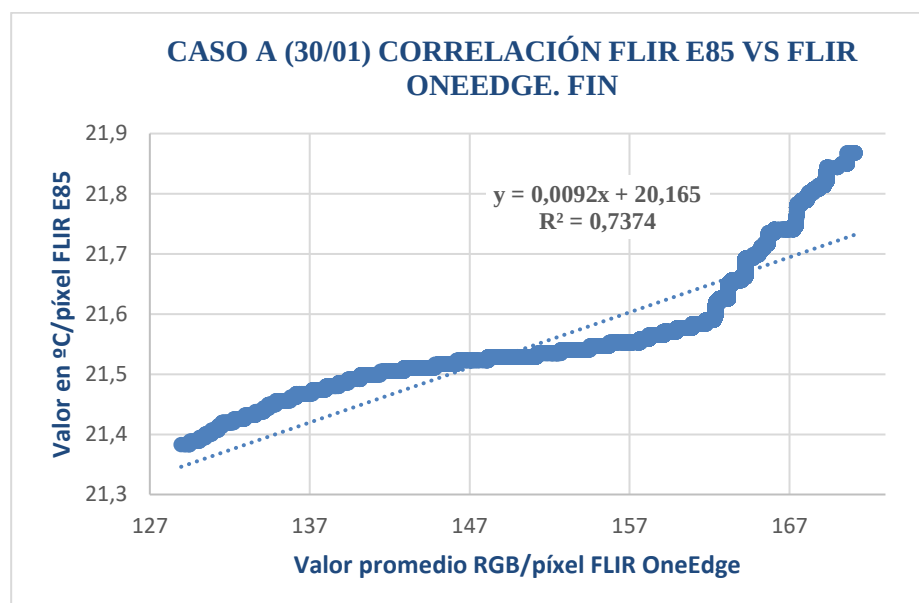


Figura 4-24 Correlación entre la FLIR OneEdge y la FLIR E85 en el momento final del caso 30 de enero [Autoría propia].

Se observa que la correlación tiene tendencia a ser lineal viendo el valor de la R^2 en las figuras previas, más ajustada en el momento inicial. Se toma el momento inicial y el final para obtener una ecuación de correlación promedia, quedando de la siguiente forma (Ecuación 11):

$$y = 0,0303 \cdot x + 16,6615 \quad (\text{Ecuación 11})$$

siendo “y” el valor convertido a unidades de °C en un píxel de una imagen de la FLIR OneEdge, y “x” el valor promedio RGB de ese píxel de esa imagen que viene de entrada tras su adquisición con la FLIR OneEdge. Con la Ecuación 11, se puede convertir a unidades de °C en las imágenes de la FLIR OneEdge del 23 de enero, concretamente a partir de los recortes obtenidos tras emplear de nuevo el segundo ejecutable. Esos recortes son basados en la zona de interés trazada, que será la misma con respecto a la utilizada en las imágenes de la FLIR E85 mediante el software del FLIR Tools para el cálculo del *U-value*. En la Figura 4-25 se muestra el resultado de la conversión, mediante el valor promedio de cada instante temporal. En esa misma figura se representa también las temperaturas medias

que se había calculado con la FLIR E85, para así analizar sus variancias, si las hay, ya que deberían ser las mismas temperaturas medias al ser en la misma pared, mismo día y misma zona de interés. Hay que destacar que, por limitaciones técnicas, la FLIR OneEdge ha monitorizado durante 31 minutos, frente a los 73 minutos de la FLIR E85.

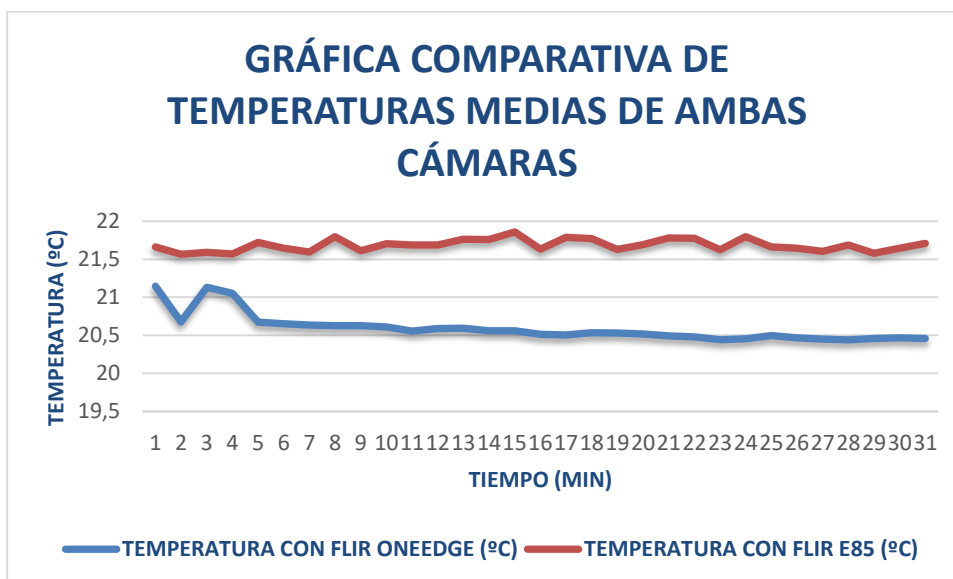


Figura 4-25 Comparación Temperaturas medias del día 23 de enero de los primeros 31 minutos, entre la FLIR OneEdge y la FLIR E85 [Autoría propia].

Con la figura previa dada, en la Figura 4-26 se comparan los U -values entre la FLIR OneEdge, la FLIR E85 y la teórica.

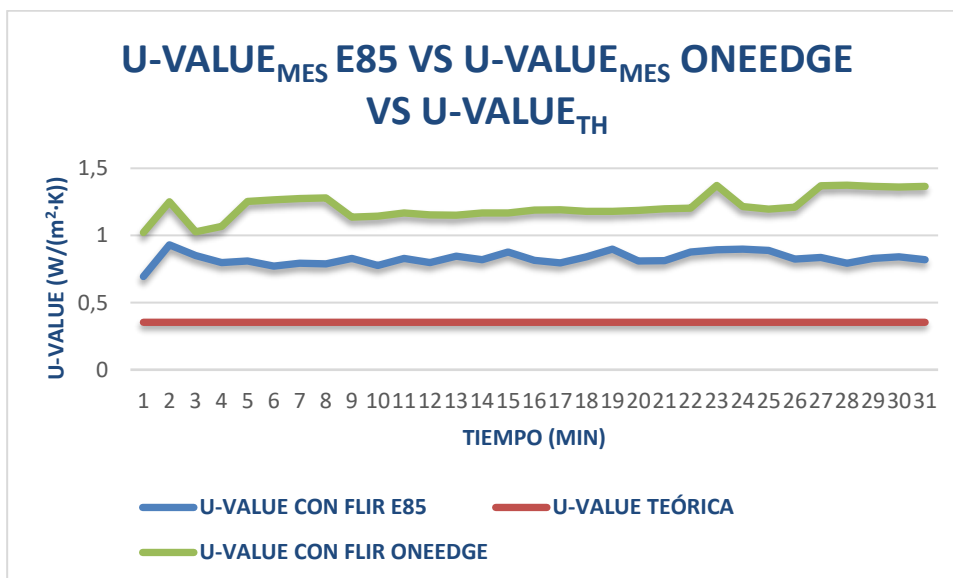


Figura 4-26 Comparación de los U -values entre la FLIR OneEdge, la FLIR E85 y la teórica [Autoría propia].

Se observa una diferencia característica entre ambos modelos reflejada en la temperatura media, y consecuentemente en el U -value, además de las diferencias de calidad de imagen bastante significativa entre ambas monitorizaciones. En la temperatura media se tiene aproximadamente un 1 °C de diferencia, y en el U -value de 0,5 (W/(m²·K)) con respecto a la FLIR E85. De todos modos, el U -value de la FLIR OneEdge es razonable, porque esa diferencia con la FLIR E85 es para alejarse aún más del valor teórico, demostrando efectivamente el deterioro de la envolvente del CUD. Por tanto, se comprueba como la precisión en la toma de datos en la cámara FLIR OneEdge, que aunque sea de peor calidad que la FLIR

E85 y se tenga que aplicar una correlación; se puede llegar a realizar un estudio tentativo de la transmitancia térmica de la envolvente de un edificio usando un equipo de unos 400-500 € frente a otro de 10000 € aproximadamente.

5 CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

5.1 Conclusiones

Una vez finalizado todo el trabajo de estudio, y el análisis sobre la transmitancia térmica de la envolvente del CUD con dos cámaras de diferente calidad, es necesario establecer las conclusiones a las que se ha llegado a lo largo del desarrollo de este trabajo de fin de grado.

La combinación de la termografía infrarroja cualitativa y cuantitativa en la misma inspección, permite la evaluación detallada de la envolvente del CUD. La principal contribución de este trabajo es el desarrollo del método IRT basado en la autora Blanca Tejedor [24], con algunas condiciones distintas a las impuestas por ella, unas por decisiones propias y otras forzadas, con el fin de llevar al extremo la metodología. Debido a las condiciones meteorológicas presentes en la villa de Marín, no se ha podido seguir algunos requisitos como por ejemplo, la diferencia de temperaturas de entre 10-15 °C entre el exterior y el interior; a causa del poco incremento de temperatura durante el transcurso del día a día. Otra condición que no se pudo cumplir fue la no existencia de precipitaciones 2 o 3 días antes del día de medición, a causa de la abundancia de precipitaciones durante los dos meses de estudio, sobre todo en el día 30 de enero. Asimismo, los sensores utilizados para la medición de la temperatura interior y la exterior no arrojaron la precisión esperada (iButtons).

Los *U-value* obtenidos con las imágenes térmicas tomadas con la cámara de alta gama (FLIR E85), comparados con los *U-value* teóricos calculados siguiendo los pasos en el Código de Técnico de la Edificación (CTE), han sido bastante esperados. El incremento del *U-value* medido con respecto al teórico se debe al deterioro de la fachada del edificio con el paso de los años y a la humedad perenne en toda la zona de Pontevedra. La diferencia mayor en el despacho 103 frente al seminario 2 observado se debe sobre todo a la exposición directa de la fachada norte a la ría de Pontevedra.

La principal diferencia observada entre ambas cámaras utilizadas ha sido la transformación de las temperaturas representadas en la imagen tomada por ambas. La FLIR E85 asocia, sin necesidad de programas auxiliares, los colores de temperatura con valores numéricos en °C. Sin embargo, en la FLIR OneEdge ha sido necesario desarrollar programas para realizar una correlación con la FLIR E85 para su posterior estudio y obtención de la *U-value*. Viendo los resultados de las comparaciones, se concluye que la FLIR OneEdge, tras la correlación, se puede usar como equipo de medición alternativo y de bajo coste en el mismo caso estudio en días diferentes. En otras palabras, en un caso de estudio determinado se podría alquilar una cámara de alta gama, sea la FLIR E85, y adquirir una de bajo coste para la correlación. Luego, el *U-value* de dicho caso de estudio solamente sería necesario usar la cámara de bajo coste, independientemente del día seleccionado de la medición.

5.2 Líneas futuras

Durante el desarrollo de este trabajo se ha centrado el foco en la planta baja del edificio del CUD, debido a que éste fue la primera estructura edificada en la Escuela Naval Militar, como se ha explicado anteriormente en el desarrollo del trabajo. Se presenta como posibles líneas futuras de estudio lo siguiente:

- El estudio del edificio completo del CUD para poder plantear un programa de reformas conforme a las fachadas más necesitadas, que corresponderán basándose en este estudio; en aquellas con orientación norte. Entre otros estudios, analizar la correlación en el Seminario 2, sobre todo para cuantificar la desviación de las mediciones de las imágenes de la FLIR OneEdge debido a la radiación emitida por la ventana, que actúa como efecto espejo enmascarando los valores RGB de los píxeles.
- Ampliar el periodo de estudio durante la estación estival para analizar el comportamiento de la envolvente, y la variación de la transmitancia térmica de toda la infraestructura con unas condiciones meteorológicas distintas a las presentes en este trabajo.
- Dado el elevado número de edificios presentes en la ENM; se propone realizar un estudio exhaustivo de todos ellos, dando preferencia a aquellos donde habita el alumnado. Con esto, se quiere poder detectar posibles fisuras y puentes térmicos para poder solucionarlo lo antes posible con el objetivo de mejorar la calidad de vida de los alumnos, así como también la salud de las infraestructuras que conforman la Escuela.
- Obtener un programa más desarrollado y simple que conecte la interfaz de las imágenes obtenidas por la cámara FLIR OneEdge, vinculándola directamente con el abanico de temperaturas mostradas en ella en °C, sin la necesidad de ir minuto a minuto capturando la imagen para su posterior estudio una a una.

6 BIBLIOGRAFÍA

- [1] «plan-accion-implementacion-a2030.pdf». Accedido: 10 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.mdsocialesa2030.gob.es/agenda2030/documentos/plan-accion-implementacion-a2030.pdf>
- [2] «¿Qué es la eficiencia energética y qué ventajas tiene? | Repsol». Accedido: 10 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.repsol.com/es/sostenibilidad/ejes-sostenibilidad/cambio-climatico/eficiencia-energetica/que-es-la-eficiencia-energetica/index.cshtml>
- [3] «Eficiencia Energética». Accedido: 10 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.miteco.gob.es/es/energia/eficiencia.html>
- [4] «Auditorías Energéticas para Empresas | RD 56/2016 | Acreditación ENAC», Circe. Accedido: 10 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.fcirce.es/auditorias-energeticas>
- [5] «Causas y efectos del cambio climático | Naciones Unidas». Accedido: 10 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.un.org/es/climatechange/science/causes-effects-climate-change>
- [6] «Auditorías Energéticas», Gen0. Accedido: 10 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://wearegen0.com/servicios/auditorias-energeticas/>
- [7] «Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico». Accedido: 10 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.miteco.gob.es/>
- [8] «Demanda energética: industrial, comercial y residencial - Norvento - Norvento». Accedido: 10 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.norvento.com/blog/demanda-energetica-industrial-comercial-y-residencial/>
- [9] «La energía en España», APPA Renovables. Accedido: 10 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.appa.es/la-energia-en-espana/>
- [10] J. A. C. Villar, «La responsabilidad social corporativa en las FAS», *Rev. Gen.*, p. 37, 2012.
- [11] M. Dowson, A. Poole, D. Harrison, y G. Susman, «Domestic UK retrofit challenge: Barriers, incentives and current performance leading into the Green Deal», *Energy Policy*, vol. 50, pp. 294-305, nov. 2012, doi: 10.1016/j.enpol.2012.07.019.
- [12] K. Sook Park y M. J. Kim, «Energy Demand Reduction in the Residential Building Sector: A Case Study of Korea». Accedido: 10 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.mdpi.com/1996-1073/10/10/1506>

- [13] G. Battista, L. Evangelisti, C. Guattari, C. Basilicata, y R. De Lieto Vollaro, «Buildings Energy Efficiency: Interventions Analysis under a Smart Cities Approach». Accedido: 10 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.mdpi.com/2071-1050/6/8/4694>
- [14] G. Mortarotti, M. Morganti, y C. Cecere, «Thermal Analysis and Energy-Efficient Solutions to Preserve Listed Building Façades: The INA-Casa Building Heritage». Accedido: 10 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.mdpi.com/2075-5309/7/3/56>
- [15] N. Soares, C. Martins, M. Gonçalves, P. Santos, L. S. da Silva, y J. J. Costa, «Laboratory and in-situ non-destructive methods to evaluate the thermal transmittance and behavior of walls, windows, and construction elements with innovative materials: A review», *Energy Build.*, vol. 182, pp. 88-110, ene. 2019, doi: 10.1016/j.enbuild.2018.10.021.
- [16] «Linseis HFM - Medidor de flujo de calor - la medición de la conductividad térmica». Accedido: 10 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.linseis.com/es/productos/difusividad-termica-y-conductividad-termica/hfm-medidor-de-flujo-de-calor/>
- [17] R. Albatici y A. M. Tonelli, «Infrared thermovision technique for the assessment of thermal transmittance value of opaque building elements on site», *Energy Build.*, vol. 42, n.º 11, pp. 2177-2183, nov. 2010, doi: 10.1016/j.enbuild.2010.07.010.
- [18] «ISO 9869-1:2014».
- [19] «Termografía infrarroja | Qué es y cómo se aplica en la industria». Accedido: 10 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://visiontir.com/es/termografia-infrarroja-camaras-termografias-y-termometros-infrarrojos/>
- [20] «UNE-EN 13187:1998».
- [21] C. Ganem y G. Barea, «DIAGNÓSTICO DEL COMPORTAMIENTO TÉRMICO DE EDIFICIOS EN FORMA MASIVA MEDIANTE EL USO DE LA TERMOGRAFÍA INFRARROJA». AREA, 2019. [En línea]. Disponible en: https://www.area.fadu.uba.ar/wp-content/uploads/AREA2501/2501_ganem_barea.pdf
- [22] S.-I. Kim, J.-S. Choi, J.-H. Jo, J. Joe, Y.-H. Cho, y E.-J. Kim, «Simulation-based comparative analysis of *U-value* of field measurement methods», *Case Stud. Therm. Eng.*, vol. 50, p. 103433, oct. 2023, doi: 10.1016/j.csite.2023.103433.
- [23] B. Tejedor, M. Casals, M. Gangolells, y X. Roca, «Quantitative internal infrared thermography for determining in-situ thermal behaviour of façades», *Energy Build.*, vol. 151, pp. 187-197, sep. 2017, doi: 10.1016/j.enbuild.2017.06.040.
- [24] «UNE-EN ISO 6946:2012». [En línea]. Disponible en: <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0049213>
- [25] E. P. Melgarejo Alvarez y J. J. Condori Flores, «CONTROL DE CALIDAD MEDIANTE TERMOGRAFIA INFRARROJA ACTIVA, COMO ENSAYO NO DESTRUCTIVO, PARA DETECTAR Y EVALUAR FALLAS EN JUNTAS SOLDADAS». Universidad Católica de Santa María, 2023.
- [26] M. Massoud, *Engineering thermofluids*, vol. 2005. Springer, 2005.
- [27] R. A. Cengel, *Introduction to thermodynamics and heat transfer*. McGraw-Hill, 2008.
- [28] T. Astarita y G. M. Carlomagno, *Infrared thermography for thermo-fluid-dynamics*. Springer Science & Business Media, 2012.
- [29] «Espectro Electromagnético - Concepto, regiones, usos e importancia», <https://concepto.de/>. Accedido: 3 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://concepto.de/espectro-electromagnetico/>

- [30] J. Luque Ordoñez, «Espectro electromagnético y espectro radioeléctrico». AUTORES CIENTÍFICO-TÉCNICOS Y ACADÉMICOS, 2012. [En línea]. Disponible en: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.acta.es/medios/articulos/ciencias_y_tecnologia/062017.pdf
- [31] S. Lagüela, L. Díaz-Vilariño, y D. Roca, «Infrared thermography: Fundamentals and applications», *Non-Destr. Tech. Eval. Struct. Infrastruct. CRC Press Boca Raton FL USA*, pp. 113-138, 2016.
- [32] R. Oltra-Carrió, F. Baup, S. Fabre, R. Fieuzal, y X. Briottet, «Improvement of soil moisture retrieval from hyperspectral VNIR-SWIR data using clay content information: From laboratory to field experiments», *Remote Sens.*, vol. 7, n.º 3, pp. 3184-3205, 2015.
- [33] «Corrección de emisividad /Estimación en el lugar de trabajo», The Snell Group. Accedido: 10 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.thesnellgroup.com/featured-tips/correccion-de-emisividad-estimacion-en-el-lugar-de-trabajo>
- [34] R. Schacht, C. H. Gerner, T. Nowak, D. May, B. Wunderle, y B. Michel, «Miniaturized black body radiator for IR-detector calibration—Design and development», en *2010 16th International Workshop on Thermal Investigations of ICs and Systems (THERMINIC)*, IEEE, 2010, pp. 1-5.
- [35] A. Moropoulou, N. P. Avdelidis, M. Kouli, y I. Tzevelekos, «Determination of emissivity for building materials using infrared thermography», *J. Thermol. Int.*, vol. 10, n.º 3, pp. 115-118, 2000.
- [36] S. Lagüela, L. Díaz-Vilariño, y D. Roca, «Infrared thermography: Fundamentals and applications», *Non-Destr. Tech. Eval. Struct. Infrastruct. CRC Press Boca Raton FL USA*, pp. 113-138, 2016.
- [37] R. Andrade Paredes y E. S. Gonzalez Herrera, «Implementación de un modulo sensor de temperatura por radiación infrarroja», 2021.
- [38] P. A. Fokaides y S. A. Kalogirou, «Application of infrared thermography for the determination of the overall heat transfer coefficient (*U-value*) in building envelopes», *Appl. Energy*, vol. 88, n.º 12, pp. 4358-4365, 2011.
- [39] F. Asdrubali, G. Baldinelli, y F. Bianchi, «A quantitative methodology to evaluate thermal bridges in buildings», *Appl. Energy*, vol. 97, pp. 365-373, 2012.
- [40] S. J. Hook, «HysPIRI Level-2 Thermal Infrared (TIR) land surface temperature and emissivity algorithm theoretical basis document.», 2011.
- [41] D. W. Lewis, H. O. Goller, y C. D. Teates, «Apparent temperature degradation in thermograms of human anatomy viewed obliquely», *Radiology*, vol. 106, n.º 1, pp. 95-99, 1973.
- [42] W. Luo, J. Wu, J. Peng, y B. Zhang, «Influence of surface treatment of components on thermal radiation performance in infrared optical systems», en *7th International Symposium on Advanced Optical Manufacturing and Testing Technologies: Large Mirrors and Telescopes*, SPIE, 2014, pp. 171-178.
- [43] C. GANEM KARLEN, «Termografía infrarroja para el diagnóstico térmico confiable con alta replicabilidad y bajo costo de viviendas en Mendoza, Argentina». Revista hábitat sustentable, 2018.
- [44] E. Miquel Hernández, «Cámaras termográficas (IR térmico)», 2020, Accedido: 11 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://riull.ull.es/xmlui/handle/915/21422>
- [45] M. Solla, S. Lagüela, B. Riveiro, y H. Lorenzo, «Non-destructive testing for the analysis of moisture in the masonry arch bridge of Lubians (Spain)». Structural Control and Health Monitoring, 2012.
- [46] M. H. M. Barreto, C. A. H. Tabares, y J. B. Mejía, «La extensión universitaria y sus posibilidades de transformación cultural, social y artística». UTP.

- [47] R. Usamentiaga, P. Venegas, J. Guerediaga, L. Vega, J. Molleda, y F. G. Bulnes, «Infrared Thermography for Temperature Measurement and Non-Destructive Testing», *Sensors*, vol. 14, n.º 7, Art. n.º 7, jul. 2014, doi: 10.3390/s140712305.
- [48] T. Li, D. P. Almond, y D. A. S. Rees, «Crack imaging by scanning pulsed laser spot thermography», *NDT E Int.*, vol. 44, n.º 2, pp. 216-225, mar. 2011, doi: 10.1016/j.ndteint.2010.08.006.
- [49] T. Pahlberg, M. Thurley, D. Popovic, y O. Hagman, «Crack detection in oak flooring lamellae using ultrasound-excited thermography», *Infrared Phys. Technol.*, vol. 88, pp. 57-69, ene. 2018, doi: 10.1016/j.infrared.2017.11.007.
- [50] L. Arias Parada y V. F. Jara Olave, «Correlación de eficiencia cuántica de emisión y absorción para el análisis de celdas solares de silicio a través de imágenes en la banda del infrarrojo cercano.» Universidad de Concepción, 2023. [En línea]. Disponible en: <http://repositorio.udec.cl/jspui/handle/11594/11626>
- [51] A. Hormaetxe Romero, «Diseño de un sistema low-cost para la medida de la difusividad térmica mediante termografía infrarroja», nov. 2020, doi: 10/47694.
- [52] C. A. Balaras y A. A. Argiriou, «Infrared thermography for building diagnostics», *Energy Build.*, vol. 34, n.º 2, pp. 171-183, feb. 2002, doi: 10.1016/S0378-7788(01)00105-0.
- [53] Pablo, «Diagnóstico por termografía para mejorar el aislamiento de las viviendas | Soluvent», Soluvent Ventanas de PVC en Bilbao - Vizcaya. Accedido: 11 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://soluvent.com/diagnostico-termografia-mejorar-aislamiento-viviendas/>
- [54] R. Albatici, A. M. Tonelli, y M. Chiogna, «A comprehensive experimental approach for the validation of quantitative infrared thermography in the evaluation of building thermal transmittance», *Appl. Energy*, vol. 141, pp. 218-228, mar. 2015, doi: 10.1016/j.apenergy.2014.12.035.
- [55] «UNI 9252:1988 - UNI Ente Italiano di Normazione». Accedido: 20 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://store.uni.com/uni-9252-1988>
- [56] P. A. Fokaides y S. A. Kalogirou, «Application of infrared thermography for the determination of the overall heat transfer coefficient (*U-value*) in building envelopes», *Appl. Energy*, vol. 88, n.º 12, pp. 4358-4365, dic. 2011, doi: 10.1016/j.apenergy.2011.05.014.
- [57] G. Dall'O, L. Sarto, y A. Panza, «Infrared Screening of Residential Buildings for Energy Audit Purposes: Results of a Field Test». Accedido: 11 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.mdpi.com/1996-1073/6/8/3859>
- [58] B. Tejedor, E. Barreira, R. M. S. F. Almeida, y M. Casals, «Automated data-processing technique: 2D Map for identifying the distribution of the *U-value* in building elements by quantitative internal thermography», *Autom. Constr.*, vol. 122, p. 103478, feb. 2021, doi: 10.1016/j.autcon.2020.103478.
- [59] «UNE-EN 13187:1998 (Ratificada) Prestaciones térmicas de edific...» Accedido: 15 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0023687>
- [60] «Results_of_Electronic_Ballot_of_RESNET_Board_on_Adopting_IR_Interim_Guidelines_4-18-12.pdf». Accedido: 15 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: https://www.resnet.us/wp-content/uploads/Results_of_Electronic_Ballot_of_RESNET_Board_on_Adopting_IR_Interim_Guidelines_4-18-12.pdf
- [61] «DA_DB-HE-1_Calculo_de_parametros_caracteristicos_de_la_envolvente.pdf». Accedido: 23 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: https://www.codigotecnico.org/pdf/Documentos/HE/DA_DB-HE-1_Calculo_de_parametros_caracteristicos_de_la_envolvente.pdf

- [62] «CAT-EC-v06.1_SEPBRE_09_Completo.pdf». Accedido: 23 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: https://www.codigotecnico.org/pdf/Programas/CEC/CAT-EC-v06.1_SEPBRE_09_Completo.pdf
- [63] «camara termografica». Accedido: 13 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://mediprec.es/venta/termografia/camaras-termograficas/c%C3%A1mara-termogr%C3%A1fica-flir-e85-812.html>
- [64] «Cámara térmica inalámbrica FLIR ONE Edge Pro - Android e iOS», Tienda de electrónica online - TODOELECTRONICA. Accedido: 13 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.todoelectronica.com/camara-termica-inalambrica-flir-one-edge-pro-android-e-ios-p-117655.html>
- [65] «FLIR ONE Edge | Teledyne FLIR». Accedido: 13 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.flir.es/products/flir-one-edge?vertical=condition+monitoring&segment=solutions>
- [66] «DS1920-F5+ | Maxim iButton», Distrelec Sweden. Accedido: 13 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.elfa.se/en/ibutton-maxim-ds1920-f5/p/17386140>
- [67] «ClimaPilot - Medidores y detectores de humedad - UMAREX GmbH & Co.KG - Laserliner». Accedido: 14 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.laserliner.com/es/productos/medidores-y-detectores-de-humedad/4021563687886-climapilot.html>
- [68] «Aplicación FLIR Tools | Teledyne FLIR». Accedido: 16 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.flir.es/products/flir-tools-app?vertical=condition+monitoring&segment=solutions>
- [69] Armada, «Armada - Ministerio de Defensa - Gobierno de España». Accedido: 17 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://armada.defensa.gob.es/ArmadaPortal/page/Portal/ArmadaEspannola/iniciohome/prefLang-es/>

ANEXO I: IMPLICACIONES SOCIALES, Y/O ECONÓMICAS, Y/O AMBIENTALES

Las implicaciones sociales, económicas y medioambientales de este TFG pueden ser bastante significativas. Centrándose especialmente sobre los beneficios obtenidos a causa de la eficiencia energética y la sostenibilidad en el sector de la construcción.

Se desarrolla el IRT, un método más rápido y preciso que el HFM, para evaluar la transmitancia y el rendimiento térmicos de los edificios. Esto ayuda a identificar áreas a mejorar en términos de aislamiento térmico, la reducción en el consumo de energía y de los gases emitidos durante el efecto invernadero. Esto fomenta lo siguiente:

- Reducción del consumo de energía: Al corregir las zonas deficientes en cuanto aislamiento térmico, se puede reducir la cantidad de energía utilizada para calentar o enfriar el interior de la vivienda, lo que conduce a una disminución significativa del consumo total de energía en el edificio.
- Ahorro de costes por parte del propietario: La mejora de esta eficiencia energética se ve reflejado en las facturas de servicios contratados, liberando recursos financieros que pueden ser destinados a otras necesidades; contribuyendo así a la reducción de la pobreza.
- Mitigación del cambio climático: Al reducir las emisiones de gases de efecto invernadero asociadas con la generación de energía, el uso del IRT contribuye directamente con la lucha contra el efecto invernadero y el cambio climático.

Un ambiente interior más confortable y térmicamente eficiente en los edificios desarrolla un impacto positivo en la salud y en el bienestar de los huéspedes, reduciendo así el riesgo de padecer enfermedades estrechamente relacionadas con el frío o el calor. Fomentándose lo siguiente:

- Mejora de la calidad de vida: La evaluación precisa de la transmitancia térmica y la eficiencia energética de los edificios conduce a mejoras importantes en la calidad de vida de los ocupantes de estos. Reduciendo las fugas de calor y frío, se crean ambientes mejores destinados a grupos vulnerables, como personas mayores o con ingresos bajos, que pueden tener alguna dificultad para mantener sus hogares con las condiciones adecuadas de vida.
- Inclusión social y equidad: La identificación de esas deficiencias energéticas estudiadas y analizadas utilizando la termografía infrarroja, puede ayudar a paliar las diferencias de clases sociales y económicas. Se promueve la equidad en el acceso de viviendas confortables y asequibles una vez construidas con la supervisión y el análisis con IRT. Las viviendas de nueva construcción tendrían todas las competencias necesarias para la vida de todo tipo de huéspedes independientemente de su condición social o económica.

La implementación de esta nueva técnica en las construcciones impulsa la innovación y la creación de nuevos puestos de trabajo en sectores relacionados con la ingeniería, arquitectura y la construcción:

- Impulso a la innovación tecnológica: La adopción de la IRT en la construcción promueve el desarrollo de nuevos equipos, herramientas y softwares especializados que complementan y mejoran el método expuesto en el TFG. Esto incluye la creación de cámaras termográficas más avanzadas que palien los defectos de las anteriores, algoritmos o programas especializados en el análisis de imágenes y datos.

Generación de empleos en sectores especializados: La implementación de la termografía infrarroja crea nuevas oportunidades laborales demandando técnicos especialistas en el uso de las cámaras termográficas, y en el tratamiento de los datos obtenidos. Esto irá acompañado de la creación de nuevas

empresas y consultoras especializadas en la IRT contribuyendo así al desarrollo y crecimiento de la industria.

ANEXO II: REFLEXIONES ÉTICAS Y SOCIALES

Este trabajo de fin de grado sobre el uso de la termografía infrarroja como método de análisis y estudio de la envolvente del edificio del CUD, no sólo contribuye al avance del conocimiento de la eficiencia energética y la construcción, sino que también suscita una concienciación mayor sobre las implicaciones éticas y sociales de la aplicación de la IRT en estos ámbitos.

La termografía infrarroja suscita una mayor sensibilización del medio ambiente, debido a la responsabilidad que desprende su uso acerca de la eficiencia energética y el impacto ambiental de las construcciones. El impacto de la IRT para la identificación de áreas dañadas en las fachadas de los edificios hace que los profesionales de la construcción tengan muy presente la idoneidad de la vivienda para que cualquier tipo de persona independientemente de su condición socioeconómica. La IRT es un punto clave que puede influir en la equidad y accesibilidad de la vivienda como se ha comentado anteriormente.

Se proporciona información detallada sobre el estado de los edificios a los consumidores, incluidas posibles deficiencias en el aislamiento térmico. Esto ayuda a proteger a los ocupantes de toma de decisiones erróneas en el momento de adquirir el inmueble, garantizando así una transparencia y claridad de la información, evitando malentendidos o prácticas engañosas. Además de esto, la IRT posibilita el derecho de todo ser humano de tener una vivienda digna donde vivir.

A medida que la termografía infrarroja se utiliza cada vez más en la evaluación de construcciones y la identificación de problemas de eficiencia energética, es importante educar y formar al público sobre su uso y limitaciones. Esto incluye enseñar a las personas sobre cómo analizar los resultados de las inspecciones termográficas, promoviendo su uso responsable. Los profesionales que realizan inspecciones termográficas deben recibir una formación adecuada, y mantener altos estándares de competencia ética y técnica. Es esencial promover la formación continua y la certificación de termógrafos para garantizar la calidad y fiabilidad de los resultados..

ANEXO III: CÓDIGO EMPLEADO PARA LOS PROGRAMAS AUXILIARES

Primer Ejecutable

```
Spyder Editor (Python 3.10)

"""
import os
os.environ["XDG_SESSION_TYPE"] = "xcb"
import cv2
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt

# =====

if __name__ == "__main__":
    print('Enter the corresponding path of the csv file')
    path = input()
    os.makedirs(path + 'Image_Gray_2D')
    os.makedirs(path + 'Image_RGB_2D')
    os.makedirs(path + 'Image_txt_1D')
    dir_list = os.listdir(path)
    print('Enter the number of images per minute')
    images_per_minute = input()
    for filepath in dir_list:
        if filepath.endswith('.csv'):
            with open(path + filepath) as file:
                content = file.readlines()
            content_without_headers = content[4:]
            number_of_rows_image = 0
            for row in content_without_headers:
                if len(row.split(';')[0]) == 0 or number_of_rows_image == 0:
                    number_of_rows_image = number_of_rows_image + 1
            else:
                break
            number_of_frames = int(len(content_without_headers)/number_of_rows_image)
            images = []
            for i in range(0, len(content_without_headers), number_of_rows_image):
                images.append(content_without_headers[i:i+number_of_rows_image])
            print('number_of_total_images = ', number_of_frames)
            fps = 30
            images_to_save = int(number_of_frames/(fps*60*int(images_per_minute)))
            print('number_of_real_images = ', images_to_save)
            step = int(number_of_frames/images_to_save)
            print('number_of_step = ', step)
```

```

for image in range(number_of_frames):
    if (image+1)/step % 1 == 0 or image == 0:
        print('image = ', image)
        number_of_columns_image = len(images[image][0].split(';')[1:])

    image_T = np.zeros([number_of_rows_image, number_of_columns_image])
    image_T_1D = []
    for i in range(number_of_rows_image):
        for j in range(number_of_columns_image):
            image_T[i][j] = images[image][i].split(';')[1+j].replace(',','.')
            image_T_1D.append(images[image][i].split(';')[1+j].replace(',','.'))
    cv2.imwrite(path + 'Image_Gray_2D/' + "Image_Gray_2D_" + str(int((image+1)/step)) + ".jpg", image_T)
    plt.imshow(image_T)
    plt.savefig(path + 'Image_RGB_2D/' + "Image_RGB_2D_" + str(int((image+1)/step)) + ".jpg")

    image_T_1D.sort()
    with open(path + 'Image_txt_1D/' + 'Image_1D_' + str(int((image+1)/step)) + '.txt', 'w') as f:
        for i in image_T_1D:
            f.write('%f\n' % float(i))

print('rows = ', number_of_rows_image)
print('columns = ', number_of_columns_image)

```

Segundo Ejecutable

```

# -*- coding: utf-8 -*-
"""
Spyder Editor (Python 3.10)
"""

import os
os.environ["XDG_SESSION_TYPE"] = "xcb"
import cv2
import numpy as np

# =====
FINAL_LINE_COLOR = (255, 255, 255)
WORKING_LINE_COLOR = (127, 127, 127)
# =====

class PolygonDrawer(object):
    def __init__(self, window_name):
        self.window_name = window_name
        self.done = False
        self.current = (0, 0)
        self.points = []

    def on_mouse(self, event, x, y, buttons, user_param):
        if self.done:
            return
        if event == cv2.EVENT_MOUSEMOVE:
            self.current = (x, y)
        elif event == cv2.EVENT_LBUTTONDOWN:
            print("Adding point # %d with position (%d,%d)" % (len(self.points), x, y))
            self.points.append((x, y))
        elif event == cv2.EVENT_RBUTTONDOWN:
            print("Completing polygon with %d points." % len(self.points))
            self.done = True

    def run(self, filepath):
        cv2.namedWindow(self.window_name, flags=cv2.WINDOW_NORMAL)
        canvas = cv2.imread(filepath)
        cv2.imshow(self.window_name, np.zeros(np.shape(canvas)[0:2], np.uint8))
        cv2.waitKey(1)
        cv2.setMouseCallback(self.window_name, self.on_mouse)

```

```
while(not self.done):
    canvas = cv2.imread(filepath)
    if (len(self.points) > 0):
        cv2.polylines(canvas, np.array([self.points]), False, FINAL_LINE_COLOR, 1)
        cv2.line(canvas, self.points[-1], self.current, WORKING_LINE_COLOR)
        cv2.imshow(self.window_name, canvas)
        if cv2.waitKey(50) == 27: # ESC hit
            self.done = True

    if (len(self.points) > 0):
        corners = np.array(self.points)
        canvas = cv2.imread(filepath) #para abrir una imagen en concreto
        crop_image = canvas[corners[0][1]:corners[3][1], corners[0][0]:corners[1][0]]
        cv2.imshow(self.window_name, crop_image)

        T_crop_image = []
        for i in range(0,np.shape(crop_image)[0]):
            for j in range(0,np.shape(crop_image)[1]):
                T_crop_image.append(np.sqrt((crop_image[i][j][0]**2 + crop_image[i][j][1]**2 + crop_image[i][j][2]**2)/3))
        T_crop_image.sort()
    else:
        cv2.imshow(self.window_name, canvas)
        crop_image = canvas
        T_crop_image = []
        cv2.waitKey()

    cv2.destroyAllWindows(self.window_name)
    return corners,crop_image,T_crop_image

# =====

if __name__ == "__main__":
    print('Enter the corresponding path of reference image')
    path = input()
    dir_list = os.listdir(path)
    corners = []
    for filepath in dir_list:
        if filepath.endswith('.jpg') or filepath.endswith('.jpeg') or filepath.endswith('.png'):
            name_image = filepath
            pd = PolygonDrawer("Crop")
            corners,crop_image,T_crop_image = pd.run(path + filepath)
            cv2.imwrite(path + "crop_image_" + name_image + ".jpg", crop_image)

            with open(path + 'T_crop_image_' + name_image + '.txt', 'w') as f:
                for number in T_crop_image:
                    f.write('%f\n' % number)

    if len(corners > 0):
        print('Enter the corresponding path of all images')
        path = input()
        print('Enter the new size of images')
        new_size = input()
        new_size_to_list = new_size.split(',')
        dir_list = os.listdir(path)
        crop_images = []
        for filepath in dir_list:
            if filepath.endswith('.jpg') or filepath.endswith('.jpeg') or filepath.endswith('.png'):
                name_image = filepath
                canvas = cv2.imread(path + filepath)
                crop_image = canvas[corners[0][1]:corners[3][1], corners[0][0]:corners[1][0]]

                crop_image_resized = cv2.resize(crop_image,(int(new_size_to_list[0]),int(new_size_to_list[1])))
                T_crop_image = []
                for i in range(0,np.shape(crop_image_resized)[0]):
                    for j in range(0,np.shape(crop_image_resized)[1]):
                        T_crop_image.append(np.sqrt((crop_image_resized[i][j][0]**2 + crop_image_resized[i][j][1]**2 + crop_image_resized[i][j][2]**2)/3))
                T_crop_image.sort()

                cv2.imwrite(path + "crop_image_" + name_image + ".jpg", crop_image_resized)
            with open(path + 'T_crop_image_' + name_image + '.txt', 'w') as f:
                for number in T_crop_image:
                    f.write('%f\n' % number)
```