



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

Diseño y aplicación de un sistema de monitorización para la optimización de simulaciones térmicas en aulas docentes.

Grado en Ingeniería Mecánica

ALUMNO: Jorge Donato Díez Álvarez

DIRECTORES: Lara Febrero Garrido

Francisco Manuel Troncoso Pastoriza

CURSO ACADÉMICO: 2021-2022

Universida_{de}Vigo



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

Diseño y aplicación de un sistema de monitorización para la optimización de simulaciones térmicas en aulas docentes.

Grado en Ingeniería Mecánica
Intensificación en Tecnología Naval
Infantería de Marina

UniversidadeVigo

RESUMEN

El presente Trabajo Fin de Grado (TFG) tiene como principal objetivo el diseño y la aplicación de un sistema de monitorización para la optimización de simulaciones térmicas en aulas docentes. En concreto, se ha aplicado el trabajo realizado a dos aulas representativas del edificio Isaac Peral, situado en la Escuela Naval Militar (ENM). Para ello, primero se ha desarrollado un sistema experimental de monitorización de temperatura y humedad relativa que registra estos datos cada 10 minutos empleando dos raspberrys con sensores SHT31-D que se han programado en Python. En segundo lugar, se ha realizado la simulación térmica en EnergyPlus del modelo energético del edificio modelado con OpenStudio.

A continuación, se han comparado los resultados experimentales extraídos de las raspberrys con los datos simulados del modelo. Sin embargo, el ajuste de los datos reales y los datos simulados no suele ser satisfactorio debido a las numerosas fuentes de error que intervienen en la simulación térmica. Una solución para esto es la calibración del modelo. Por lo tanto, en último lugar, se realiza una calibración del modelo energético para que la simulación adquiriera mayor precisión utilizando el software GenOpt. Con este software se va a modificar algún material de construcción utilizado para la simulación, realizando una serie de iteraciones hasta llegar a encontrar el valor necesario que nos permita la calibración óptima de la función error. Se concluye que el error del modelo se ve reducido tras una adecuada calibración.

De esta manera se obtendrá una simulación lo más cercana a la realidad posible. Un modelo correctamente calibrado permite la simulación de diferentes escenarios que pueden conllevar un ahorro energético en el edificio y consecuentemente económico.

PALABRAS CLAVE

Eficiencia energética, modelado térmico, simulación, calibración, GenOpt

AGRADECIMIENTOS

Quería agradecer en primer lugar a mi familia por todo el apoyo incondicional que me han dado en estos largos años. Por último, pero no por ello menos importante, dar gracias a la Brigada 422/152 por todas las adversidades que hemos pasado juntos este tiempo. Esta promoción define a la perfección la frase “solo voy más rápido, juntos vamos más lejos”.

También dar las gracias a mis tutores del TFG Lara Febrero Garrido y Francisco Manuel Troncoso Pastoriza por su guía durante este trabajo y especial ayuda en los momentos de estancamiento y dificultad.

CONTENIDO

Contenido	5
Índice de Figuras	8
1 Introducción y objetivos	13
1.1 Introducción	13
1.2 Objetivos	15
1.3 Estructura del trabajo	15
2 Estado del arte	17
2.1 Eficiencia energética en la Armada Española.....	17
2.2 Eficiencia energética	19
2.2.1 Eficiencia energética en el mundo actual	19
2.3 Eficiencia energética en edificación.	21
2.3.1 Certificación energética de edificios.....	21
2.3.2 Envolvente térmica	22
2.3.3 Confort térmico.....	24
2.4 Normativa en edificación	25
2.4.1 Código Técnico de Edificación (CTE)	25
2.4.2 Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios (RITE)	26
2.5 Simulación térmica de edificios	27
2.5.1 Simulación térmica de edificios.....	27
2.5.2 Necesidad de procedimientos de simulación	27
2.5.3 Partes del proceso de simulación matemático	28
2.6 Softwares utilizados	28
2.6.1 SketchUp.....	28
2.6.2 OpenStudio	29
2.6.3 Energy Plus.....	29
2.6.4 GenOpt.....	29
3 Desarrollo del TFG.....	31
3.1 Descripción del caso de estudio	31
3.1.1 Escuela Naval Militar	31
3.1.2 Edificio Isaac Peral	32
3.1.3 Aulas a simular	33
3.2 Sistema de monitorización	34
3.2.1 Material utilizado	34

3.2.2 Desarrollo del sistema de registro de datos	35
3.2.3 Descarga Visual Studio Code	38
3.2.4 Comprobación del SHT-31D mediante la obtención de datos desde el terminal	39
3.2.5 Código.....	40
3.2.6 Crontab	41
3.3 Modelado de las aulas docentes del Isaac Peral.....	41
3.3.1 Simulación térmica	41
3.3.2 Calibración.....	46
4 Resultados	53
4.1 Resultados de los datos experimentales	53
4.1.1 Datos obtenidos de humedad relativa y temperatura exterior	53
4.1.2 Datos de temperatura y humedad del aula 40	54
4.1.3 Datos de temperatura y humedad del aula 52	55
4.2 Resultados de la simulación térmica	56
4.2.1 Simulación del aula 40.....	56
4.2.2 Simulación del aula 52.....	58
4.3 Comparación de los datos experimentales y simulados.....	59
4.3.1 Relación de temperaturas en el aula 40	59
4.3.2 Relación de temperaturas en el aula 52	60
4.3.3 Relación de humedades relativas en el aula 40	60
4.3.4 Relación de humedades relativas en el aula 52	61
4.4 Resultados de la calibración.....	62
4.4.1 Calibración de la temperatura aula 40	62
4.4.2 Calibración de la temperatura aula 52	63
4.4.3 Calibración de la humedad relativa aula 40.....	63
4.4.4 Calibración de la humedad relativa aula 52.....	64
5 Conclusiones y líneas futuras	65
5.1 Conclusiones	65
5.2 Líneas futuras	65
6 Bibliografía.....	67
Anexo I: PLANOS EDIFICIOS ISAAC PERAL	71
Anexo II: MATERIALES AULAS ISAAC PERAL	72
Anexo III: ZONAS TÉRMICAS ISAAC PERAL	83
Anexo IV: VARIACIÓN MENSUAL	84

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1 Capacidad renovable en España. AleaSoft Energy Forecasting con datos de REE[7]...	14
Figura 2-1 Tendencias del consumo eléctrico por hogar.....	19
Figura 2-2 Consumo electricidad en España	20
Figura 2-3 Consumo energía en edificios.....	21
Figura 2-4 Zona climática[20].....	23
Figura 2-5 Mapa nacional de zonas climática[23]	24
Figura 2-6 Carta Bioclimática de Olgyay[25]	25
Figura 2-7 Logo SketchUp (página web SketchUp)[30].....	28
Figura 2-8 Logo OpenStudio (Página web OpenStudio)[31].....	29
Figura 2-9 Logo Energy Plus (página web Energy Plus)[32]	29
Figura 2-10 Página web GenOpt[33]	30
Figura 3-1, Fragata Asturias, página web Armada Española.[34]	31
Figura 3-2, Puerta de Carlos I (ENM, autoría propia).....	32
Figura 3-3. Escuela Naval Militar. [35].....	32
Figura 3-4. Edificio Isaac Peral planta baja.....	33
Figura 3-5 Edificio Isaac Peral planta alta	34
Figura 3-6 Sábana del batallón de alumno (horario escolar).....	34
Figura 3-7. Raspberry Pi 3 (Autoría propia)	35
Figura 3-8 SHT31-D (Página web adafruit)[36]	35
Figura 3-9 Micro SD (Samsung)[37]	35
Figura 3-10. PUTTY. (Autoría propia)	36
Figura 3-11 (Autoría propia)	36
Figura 3-12 Página web raspberry(Autoría propia)	37
Figura 3-13 (Autoría propia)	37
Figura 3-14 Autoría propia.....	38
Figura 3-15 Autoría propia.....	38
Figura 3-16 SHT-31D[36].....	39
Figura 3-17 Autoría propia.....	40
Figura 3-18 Autoría propia.....	40
Figura 3-19 Autoría propia.....	41
Figura 3-20 Modelado geométrico Isaac Peral.....	42
Figura 3-21 Zonas térmicas edificio simulado	42
Figura 3-22 Datos Porto de Marín Meteogalicia[39]	43
Figura 3-23 Weather File & Design Days (Autoría Propia).....	43
Figura 3-24 Schedules, ventana para explicación (Autoría Propia)	44

Figura 3-25 Ocupación Aula 40 Guardiamarinas de 2º (Autoría Propia)	45
Figura 3-26 Ocupación Aula 52 Aspirantes de primero (Autoría Propia)	46
Figura 3-27 Optimización de la función error	47
Figura 3-29 OpenStudio, material usado para optimización (Autoría Propia).....	47
Figura 3-30 Vista general calibración (Autoría Propia)	48
Figura 3-31 Command.txt archivo para calibración (Autoría Propia)	48
Figura 3-32 Archivo .idf (Autoría Propia)	49
Figura 3-33 Initialization file (Autoría Propia)	49
Figura 3-34 Configuration file (Autoría Propia)	50
Figura 4-1. Temperatura y precipitaciones Galicia 2022, (Meteogalicia).....	53
Figura 4-2 Temperatura Aula 40	54
Figura 4-3 Humedad relativa aula 40	55
Figura 4-4 Temperatura Aula 52	55
Figura 4-5 Humedad relativa Aula 52	56
Figura 4-6 Temperatura simulada Aula 40.....	57
Figura 4-7 Humedad relativa simulada Aula 40.....	57
Figura 4-8 Variables Aula 40 XesoView	58
Figura 4-9 Temperatura simulada Aula 52.....	58
Figura 4-10 Humedad relativa simulada Aula 52	59
Figura 4-11 Variables Aula 50 XesoView	59
Figura 4-12 Comparación temperaturas aula 40	60
Figura 4-13 Comparación temperaturas aula 52	60
Figura 4-14 Comparación humedad relativa aula 40	61
Figura 4-15 Comparación humedad relativa aula 52	61
Figura 4-16 Calibración temperatura aula 40	62
Figura 4-17 Calibración temperatura aula 52.....	63
Figura 4-18 Calibración humedad relativa aula 40	63
Figura 4-19 Calibración humedad relativa aula 52	64
Figura 0-1 Planta baja Isaac Peral formato DWG. (CAD).....	71
Figura 0-2 Primera planta Isaac Peral formato DWG. (CAD)	71
Figura 0-1 Propiedades hormigón de suelo	72
Figura 0-2 Propiedades hormigón ligero	73
Figura 0-3 Propiedades hormigón pesado	74
Figura 0-4 Propiedades ladrillo	75
Figura 0-5 Propiedades membrana del techo	76

Figura 0-6 Propiedades recubrimiento de stucco	77
Figura 0-7 Propiedades de yeso paredes exteriores.....	78
Figura 0-8 Propiedades yeso paredes interiores	79
Figura 0-9 Propiedades azulejo acústico suelo.....	80
Figura 0-10 Propiedades cubierta metálica	81
Figura 0-11 Propiedades cámara de aire paredes	82
Figura 0-12 Propiedades resistencia al espacio aéreo del techo.....	82
Figura 0-1 Zonas térmicas Isaac Peral	83
Figura 0-1 Temperatura mensual Aula 40.....	84
Figura 0-2 Humedad Relativa mensual Aula 40	84
Figura 0-3 Temperatura mensual Aula 52.....	85
Figura 0-4 Humedad relativa mensual Aula 52.....	85

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 4-1 Resultados calibración	62
Tabla 4-2 Espesor tras calibración	62

1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1 Introducción

Hoy en día, es una realidad que el cambio climático es uno de los problemas medioambientales más importantes a los que la sociedad se está enfrentando. Antes que nada, es necesario expresar que es común que se piense que tanto el calentamiento global como el cambio climático son dos palabras sinónimas. Aunque son dos palabras especialmente cercanas, su principal diferencia es que el cambio climático es la consecuencia del calentamiento global.

El cambio climático se refiere a el cambio de la temperatura y patrones climáticos. La actividad humana ha sido uno de los principales causantes destacando la quema de combustibles fósiles como el petróleo, el gas y el carbón. La quema de estos y otros combustibles producen emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) provocando el cambio climático. [1]

Según la OMM (Organización Meteorológica Mundial)[2] y el Parlamento Europeo actualmente hoy hay más de un 40% de los gases de efecto invernadero acumulado en la atmósfera siendo el ser humano el principal causante del cambio climático y de las emisiones de gases de efecto invernadero. El CO₂, es el gas más conocido causante del 63% del calentamiento global destacando también el metano o el óxido nitroso. La OMM reconoce que el 40% de las emisiones en España proviene del transporte, tanto de coches, autobuses como embarcaciones acuáticas o aéreas. Otra de las causas que la OMM considera principales son tanto la industria química o petrolera como la de cloro o de la metalurgia por la gran cantidad de residuos que generan. El CO₂, como se ha dicho previamente es el gas que más se emite y sabiendo que los árboles tienen la virtud de transformar el CO₂ en oxígeno.[2]

Desde el 2001, el Tercer Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) [3] señaló que se está acumulando pruebas convincentes de la existencia y de los impactos del cambio climático. De media, las temperaturas incrementaron alrededor de 0,6°C en el siglo XX. Los niveles del mar han aumentado entre 10 y 12 centímetros, lo que los investigadores creen que se debe a la expansión de océanos cada vez más cálidos.

El informe de Síntesis del Quinto Informe de Evaluación del IPCC, que se publicó en noviembre de 2014, concluyó que la influencia humana en el sistema climático es clara y creciente, con impactos observados en todos los continentes. Si no se frena, el cambio climático producirá impactos graves, irreversibles y generalizados en las personas y ecosistemas.[4]

La respuesta a este problema en el contexto de las Naciones Unidas es la Convención Marco sobre el Cambio Climático (CMNUCC). Adoptada en 1992 y en vigor desde 1994, la Convención Marco de Naciones Unidas sobre el cambio climático ha sido ratificada por 195 países (entre ellos España). La

convención reconoce la existencia del cambio climático y tiene como objetivo la estabilización de las concentraciones de gases de efecto invernadero para evitar perturbaciones antropogénicas peligrosas en el sistema climático. Todo esto debe alcanzarse dentro de un marco de tiempo necesario para que los ecosistemas se adapten al cambio climático, que el desarrollo económico avance de manera sostenible y para garantizar que la producción de alimentos no se vea amenazada. [5]

De esta Convención cabe destacar el conocido Protocolo de Kioto (1997) en el que se establece un acuerdo internacional con la finalidad de reducir las emisiones de los gases causantes del efecto invernadero (GEI)[6], que son el vapor de agua (H_2O), dióxido de carbono (CO_2), el óxido nitroso (N_2O), el metano (CH_4) y el ozono (O_3).

La última Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, la COP26 que fue aplazada por la pandemia del COVID-19, reunió a más de 200 representantes de diferentes países. La COP26 tenía el objetivo de acelerar la acción climática con el fin del cumplimiento del Acuerdo de París, avanzar hacia una economía neutra en carbón y limitar el aumento de temperatura a $1,5^\circ C$.

La relación entre la energía y el cambio climático es muy fuerte. De hecho, es el elevadísimo consumo de combustibles el que está provocando el calentamiento global que se está produciendo y que se experimentará en las próximas décadas. Desde el comienzo de la era industrial, el consumo de energía procedente de combustibles fósiles (carbón, petróleo y gas natural) ha aumentado constantemente. La única forma de frenar el cambio climático es cambiar nuestros hábitos de consumo. Lo que se necesita es producir más con menos recursos, aumentar la eficiencia energética de todos los procesos y sustituir el consumo de energía fósil por fuentes de energía renovables como se puede observar en la Figura 1-1.

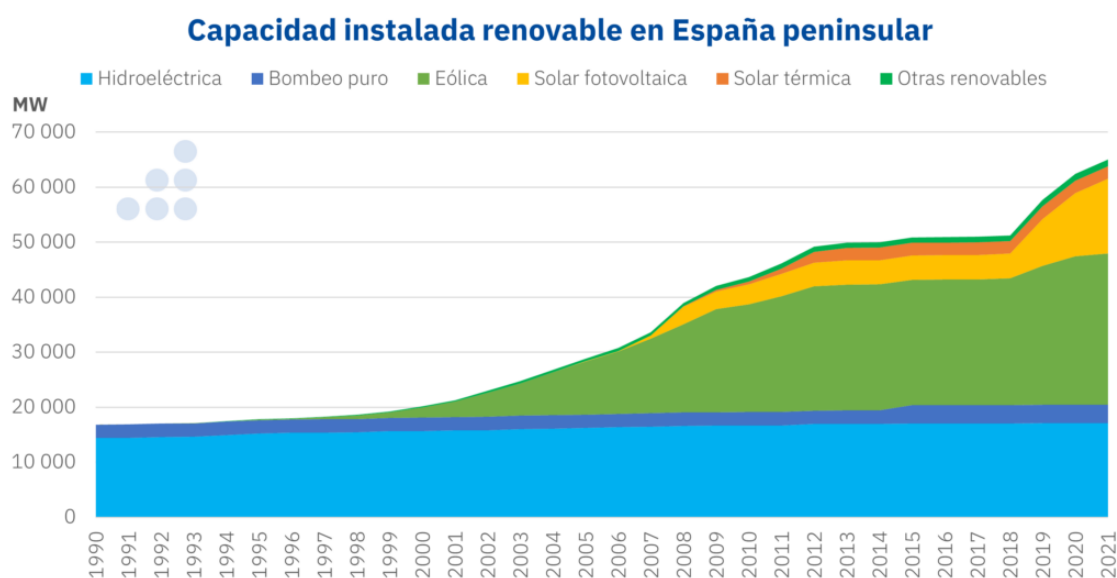


Figura 1-1 Capacidad renovable en España. AleaSoft Energy Forecasting con datos de REE[7]

Dentro de las FAS cabe destacar la directiva 107/1997 [8] del Ministerio de Defensa sobre protección del Medio Ambiente. Directiva que manifiesta que la política medioambiental se centrará en el concepto de desarrollo sostenible, debiendo ser compatible con la misión de las Fuerzas Armadas y dirigida a la conservación, protección y recuperación de las condiciones medioambientales. Calificando esto el Ministerio de Defensa como un reto tanto nacional como internacional.

1.2 Objetivos

El objetivo principal de este TFG es el diseño e instalación de un sistema de monitorización para su empleo en la optimización de simulaciones térmicas de aulas docentes. Este estudio se realizará mediante un modelo energético de dicho edificio para su posterior estudio con los softwares OpenStudio, SketchUp, Energy Plus y GenOpt. Dicho objetivo se debe a que primordialmente la protección del medio ambiente es una demanda social y la Armada está absolutamente implicada en esta voluntad y es por ello por lo que desde hace años se están efectuando numerosas actividades encaminadas a la prevención de la contaminación marina y atmosférica, y ahorro energético tal y como viene definido en las Líneas Generales de la Armada:

"La Armada continuará impulsando medidas de protección ambiental en buques e instalaciones en tierra y mantendrá su política de minimizar el impacto sobre la vida marina y el medio ambiente durante la realización de actividades de preparación de la fuerza.[7]"

A lo largo de este apartado se pretende fijar una serie de objetivos que se intentará llevar a cabo a medida que se va desarrollando el trabajo, considerando estos una especie de objetivos intermedios con la finalidad de alcanzar la meta principal:

- Familiarización con los softwares geométricos nombrados anteriormente, incluyendo un conocimiento previo detallado del SketchUp. El programa principal de diseño energético a utilizar será el OpenStudio y junto con EnergyPlus se podrán realizar simulaciones con sus correspondientes resultados y posterior calibración con el software GenOpt.
- Alcanzar un conocimiento básico necesario de programación en Python, para realizar de la forma más eficiente posible la configuración de tanto las raspberrys como los SHT-31D que se van a emplear en el desarrollo de este trabajo para la recogida de datos.
- Obtener la mayor información posible del edificio de enseñanza Isaac Peral como su uso, ocupación, descripción arquitectónica y elementos de climatización entre otros mediante la recopilación de datos técnicos y constructivos.
- Diseño del registro automático y continuo de dichos datos.
- Obtención de los datos de temperatura y humedad relativa durante el mes de febrero y marzo mediante los SHT31-D programados para ello de las aulas 40 y 52 del edificio Isaac Peral
- Simulación de las mismas variables con un archivo osm. adaptado de otro TFG.
- Análisis de los datos obtenidos tanto de los datos experimentales como de la simulación, y su posterior comparación.
- Calibración de los datos obtenidos mediante el software GenOpt, mediante la modificación de materiales de construcción del edificio Isaac Peral. Realización del número necesario de iteraciones hasta la optimización.

1.3 Estructura del trabajo

Este trabajo está estructurado por una serie de apartados que tienen como finalidad explicar de una forma concisa, clara y completa todos y cada uno de los pasos necesarios para alcanzar los objetivos establecidos en el apartado 1.2.

Con este objetivo, en el estado del arte se va a comentar todos los temas necesarios para situar el contexto del tema que se va a tratar posteriormente. Inicialmente, explicando la política de protección y conservación Fuerzas Armadas basado en el concepto de desarrollo sostenible. A continuación, se explicará y se intentarán asentar las bases para intentar entender el concepto de eficiencia energética en el mundo actual, analizándose en detalle posteriormente en el edificio Isaac Peral, tratándose este de un edificio en el que los horarios y las cargas de personas son totalmente variables a lo largo de un día como veremos posteriormente. También se pretenden abordar aspectos íntimamente relacionados y de

aplicación en el presente TFG, como la normativa general de aplicación, entre las que se han incluido el Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios (RITE) y el Código Técnico de Edificación (CTE). Aparte, se ofrece cronológicamente una visión sobre los softwares que se van a utilizar en las distintas simulaciones.

En segundo lugar, se empezará con el desarrollo del trabajo. Se comenzará con una breve descripción del Edificio Isaac Peral, instalación usada por los futuros oficiales de la Armada Española en sus jornadas docentes, explicando una serie de factores que influyen en su simulación como son el entorno, la orientación, la localización, materiales de construcción y características arquitectónicas. Se explicará el proceso de programación en Python necesario de las distintas raspberrys utilizadas para la obtención de los distintos datos a estudiar. Se comentará como se ha realizado la simulación realizada en el software OpenStudio y EnergyPlus para su posterior análisis y comparación con los datos experimentales sacados en los pasos anteriores. Tras esto, se realizará una calibración mediante el software Genopt.

Por último, con los resultados obtenidos se realizarán una serie de comparativas y comentarios para el análisis y se sacarán una serie de conclusiones que nos ayudarán a mejorar futuras optimizaciones tanto del Edificio Isaac Peral como cualquier edificio o instalación que las Fuerzas Armadas considere necesario.

2 ESTADO DEL ARTE

2.1 Aplicación de la eficiencia energética en la Armada Española

Uno de los principales órganos de las Fuerzas Armadas como es el Ministerio de Defensa, es absolutamente consciente de la tremenda importancia que tiene la protección del medio ambiente. Tanto es así, que viene realizando desde el 97, año en el que fue aprobada la Directiva 107/9[8] sobre la protección del Medio Ambiente, una serie acciones y medidas que relacionan todas las misiones y objetivos que ya de por sí tiene el Ministerio de Defensa con la meta de protección del medioambiente que dispone la Constitución Española en el artículo 45.

Artículo 45[9]

- 1. Todos tienen el derecho a disfrutar de un medio ambiente adecuado para el desarrollo de la persona, así como el deber de conservarlo.*
- 2. Los poderes públicos velarán por la utilización racional de todos los recursos naturales, con el fin de proteger y mejorar la calidad de la vida y defender y restaurar el medio ambiente, apoyándose en la indispensable solidaridad colectiva.*
- 3. Para quienes violen lo dispuesto en el apartado anterior, en los términos que la ley fije se establecerán sanciones penales o, en su caso, administrativas, así como la obligación de reparar el daño causado.*

El Ministerio de Defensa contempla una política de protección y conservación del medioambiente que se basa en el concepto de desarrollo sostenible, más en detalle, compatibilizar el término de desarrollo tecnológico con el gran respeto que tienen los militares a la naturaleza. Los principios básicos que sustenta nuestra política medioambiental son el ordenamiento comunitario y nacionales de prevención, mejora y protección del medioambiente, respuesta al riesgo medioambiental y sobre todo destacando por encima de estas últimas, la eficiencia en el uso de los recursos.

Esta política medioambiental en el ámbito de la marina española no es nada extraño. Las autoridades marítimas de algunos países del mundo fueron los primeros profesionales en advertir de la necesidad de la regulación del vertido de residuos desde los buques y llevar a cabo una remodelación o incluso creación de nuevos sistemas y equipos de tratamiento. Para ello se desarrolló el Convenio Internacional MARPOL 73/78, promovido por la Organización Marítima Internacional y ratificado por el Gobierno español en 1984.[10]

En infraestructuras de la Armada Española en tierra, la política se especifica de acuerdo con el modelo ISO 14001, en los sistemas de gestión medioambiental (SGA). En la prueba que se realizó en

algunos países de la OTAN, fue una unidad de la armada la primera en conseguir en 1977 la certificación SGA. Desde entonces, nuestro tan querido por los Infantes de Marina, el campo de maniobras Sierra del Retín, mantiene dicho certificado.

Un Sistema de Gestión Medioambiental (SGA) es definido por la norma internacional ISO 14001 y por el Reglamento europeo EMAS como la parte del sistema general de gestión que incluye la estructura organizativa, la planificación de las actividades, las responsabilidades, las prácticas, los procedimientos, los procesos y los recursos para desarrollar, implantar, llevar a efecto, revisar y mantener al día la política medioambiental.[11]

La certificación 14001 proporciona una serie de recursos para que la Armada Española pueda mejorar por un lado el resultado medioambiental y por otro el económico, teniendo en mente la vinculación de finalidades ambientales con los resultados económicos determinados. Con esta certificación se intenta reducir el impacto de todos lo que engloba a la Armada en el Medio Ambiente para crear beneficios internos, uniendo los componentes medioambientales y económicos con el fin de que se desarrollen de forma sostenible.[12]

Las ventajas que quiero destacar de la certificación ISO 14001 en el ámbito de la Armada relacionados con mi trabajo son:

- Reducir el gasto en energía eléctrica, combustibles, agua y materia prima.
- Ahorrar costes a largo plazo.
- Proporcionar una sistemática de trabajo orientada a obtener los resultados ambientales planificados.
- Prevenir la contaminación del suelo, agua y aire mejorando el control de las emisiones.
- Mejorar la gestión de residuos, especialmente los peligrosos, reduciéndose la generación de desperdicios y costes de su eliminación.
- Ayudar a armonizar los procesos de trabajos en el conjunto de la Armada.
- Mejora continua permitiendo una mayor eficiencia en el consumo de materias primas y un aumento en el rendimiento que conlleve a una reducción de costes.

La implantación de esta certificación es considerada bastante positiva, Se cuentan actualmente con 26 UCOS que cuentan con sistemas de gestión implantadas con sus consecuentes mejoras significativas.

El Jefe de Apoyo Logístico de la Armada, el almirante Estanislao Pery, aseguró en el año 2013 que para la Armada: “la búsqueda de la eficiencia energética y el cuidado del medio ambiente no son un interés suscitado por la crisis económica sino que ha sido perseguido desde hace tiempo.[11]”

2.2 Eficiencia energética

2.2.1 Eficiencia energética en Europa y España

Los edificios son una parte muy esencial de nuestra vida diaria e incluso gran parte de la ciudadanía pasan la mayoría de sus días en el interior, ya sea en casa, en el trabajo o incluso en el ocio. Sin embargo, los inmuebles de todo tipo (escuelas, hospitales, bibliotecas u otros edificios públicos) son los mayores consumidores de energía de la Unión Europea y uno de los mayores emisores de dióxido de carbono.

En general los edificios son los responsables del 40% del consumo de energía en la Unión Europea y del 36% de las emisiones de gases de efecto invernadero, que se generan principalmente durante la construcción, renovación y la demolición. Actualmente alrededor del 75% del suministro de la construcción de la UE es energéticamente ineficiente. Esto significa que una parte importante de la energía consumida se desperdicia. Las pérdidas de energía pueden reducirse modernizando los edificios existentes e invirtiendo en soluciones inteligentes y materiales energéticamente eficientes para nuevas construcciones.[13]

Como ya se ha mencionado, la electricidad ha ido ganando protagonismo en la cobertura de la demanda energética de los hogares españoles tal y como se puede observar en la Figura 2-1. Esta dinámica es correlativa a la progresiva penetración del equipamiento eléctrico en los hogares españoles, aproximándose al nivel medio de consumo de los hogares de la UE. En los últimos años en ambos indicadores nacional y europeo se observa una tendencia a la baja, donde se superponen los efectos de la crisis, precios de la electricidad, además de mejoras tecnológicas en iluminación y equipamiento electrodoméstico de los hogares, a lo que se une cierta saturación en el nivel de equipamiento.[14]

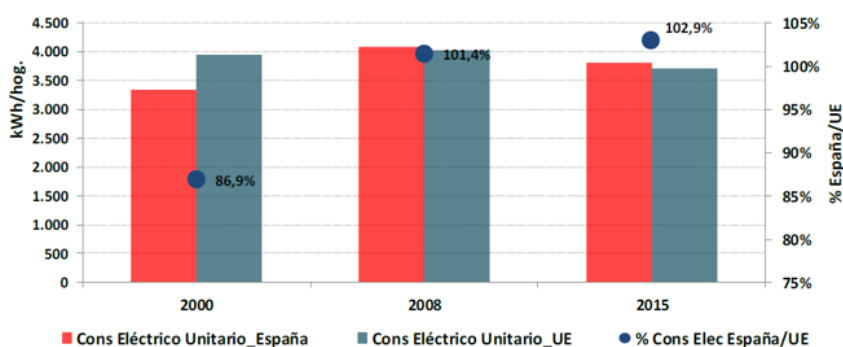


Figura 2-1 Tendencias del consumo eléctrico por hogar

Actualmente, casi el 84% de los edificios en España consumen más energía de la necesaria, es decir, son energéticamente ineficientes tal y como se muestra en la Figura 2-2. En España, los edificios son actualmente responsables del 31% del consumo de la energía. Una realidad que repercute directamente

en el bolsillo de los españoles, ya que la eficiencia energética va estrechamente ligada a un ahorro en el consumo.[15]

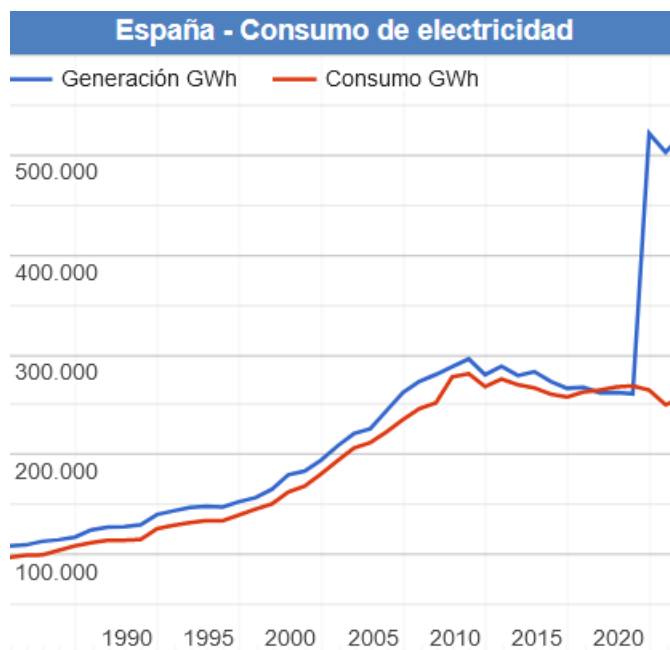


Figura 2-2 Consumo electricidad en España

En la última época, la medición de los diferentes consumos de energía de los edificios, la recopilación de datos y el internet de las cosas han dado lugar a la disponibilidad de numerosos datos relacionados con la construcción y energía. La fortuna actual en términos de infraestructuras digital ha crecido a un nivel muy alto.

La renovación de los edificios que ya están en uso podría llevar a cabo una reducción del consumo total de la energía alrededor de un 6% y reducir las emisiones de dióxido de carbono en aproximadamente un 5%. Sin embargo, menos del 1% de los parques inmobiliarios nacionales se renuevan de media cada año. Para lograr los objetivos climáticos y energéticos, se necesita al menos duplicar las tasas actuales de renovación.[16]

El sector de los edificios ha ido aumentando su participación en el consumo final de energía, en contraste con el sector industrial, cuyo peso relativo ha ido reduciéndose. En los últimos años, en el contexto de la crisis, el consumo energético de los edificios ha seguido una pauta descendente, al igual que en otros países vecinos, apreciándose un cambio de tendencia a partir de 2014, coincidiendo con el mayor dinamismo mostrado por la economía española desde entonces. El consumo medio per cápita de los edificios en España es 0,53 tep, un tercio por debajo del consumo medio de los países de la UE. La diferencia se explica en gran parte por la climatología más favorable de España.[17]

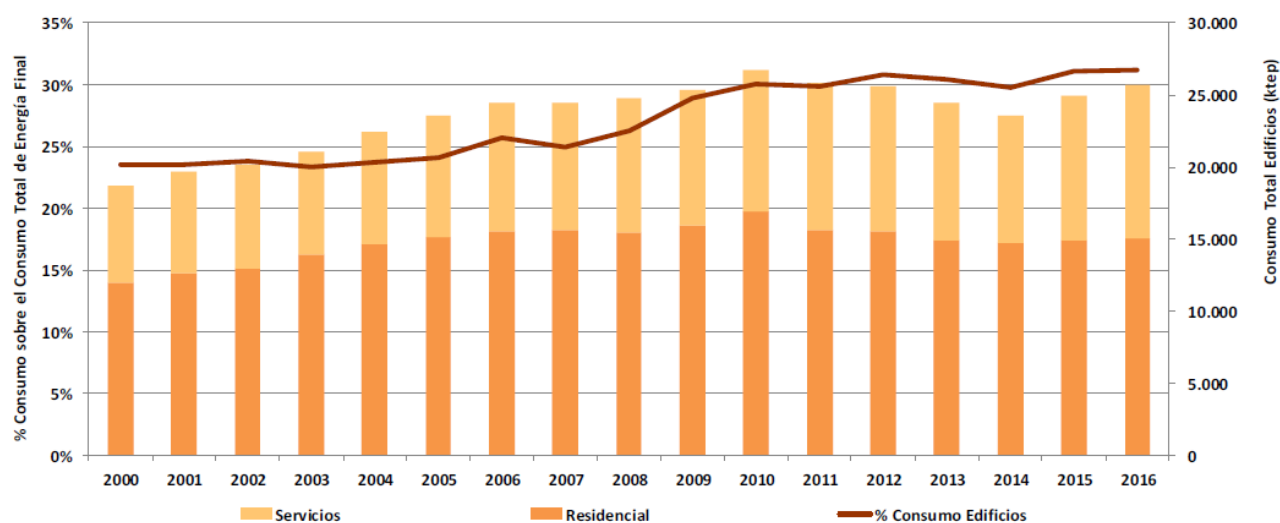


Figura 2-3 Consumo energía en edificios

2.3 Eficiencia energética en edificación.

2.3.1 Certificación energética de edificios

El Real Decreto 325/2013[18] aprueba el procedimiento básico para la certificación de la eficiencia energética y establece que el objeto es el establecimiento de las condiciones técnicas y administrativas para realizar las certificaciones de eficiencia energética de los edificios y la metodología de cálculo de su calificación de eficiencia energética, considerando aquellos factores que más incidencia tienen en el consumo de energía de los edificios.

En el artículo 1 de este Real Decreto diferencia entre:

1. Certificación de eficiencia energética del edificio terminado o de parte del mismo
2. Certificación de eficiencia energética del edificio ya existente o de parte del mismo.

En el artículo 2, se especifica su aplicación a:

- A. Edificios de nueva construcción
- B. Edificios o partes de edificios existentes que se vendan o alquilen a un nuevo arrendatario, siempre que no dispongan de un certificado en vigor
- C. Edificios o partes de edificios en los que una autoridad ocupe una superficie útil total superior a 250m² y que sean frecuentados habitualmente por el público.

También exenta del CEE a los siguientes:

- a) Edificios protegidos oficialmente por ser parte de un entorno declarado o en razón de su particular valor arquitectónico o histórico, siempre que cualquier actuación de mejora de la eficiencia energética alterase de manera inaceptable su carácter o aspecto, siendo la autoridad que dicta la protección oficial quien determine los elementos inalterables.
- b) Edificios o partes de edificios utilizados exclusivamente como lugares de culto y para actividades religiosas.
- c) Construcciones provisionales con un plazo previsto de utilización igual o inferior a dos años

- d) Edificios industriales, de la defensa y agrícolas no residenciales, o partes de los mismos, de baja demanda energética. Aquellas zonas que no requieran garantizar unas condiciones térmicas de confort, como las destinadas a talleres y procesos industriales, se considerarán de baja demanda energética.
- e) Edificios o partes de edificios aislados con una superficie útil total inferior a 50 m²
- f) Edificios que se compren para reformas importantes o demolición.
- g) Edificios o partes de edificios existentes de viviendas, cuyo uso sea inferior a cuatro meses al año, o bien durante un tiempo limitado al año y con un consumo previsto de energía inferior al 25 por ciento de lo que resultaría de su utilización durante todo el año, siempre que así conste mediante declaración responsable del propietario de la vivienda

En 3 de junio de 2021, el RD 235/2013 deroga definitivamente el RD 235/2013, que regula el procedimiento básico para la certificación energética de los edificios desde 2013. Una de las causas de este cambio se debe a la necesidad de adaptarse a la normativa española de descarbonización a 2050, con la finalidad de regular el consumo de los edificios para mejorar su rendimiento energético.

Así mismo este Real Decreto 390/2021 modifica a:

- RD 56/2016 de 12 de febrero, relativo a la eficiencia energética
- RD 178/2021 de 23 de marzo, por el que se modifica el RD 1027/2007 de 20 de julio (RITE).

El RD 390/2021 [19], en su artículo 3 establece su ámbito de aplicación en:

1. Edificios de nueva construcción.
2. Edificios o partes de edificios que se vendan o alquilen a un nuevo arrendatario.
3. Edificios o partes de edificios pertenecientes u ocupados por al Administración Pública. Será obligatorio para aquellos cuya superficie útil total sea superior a 250 m².
4. Edificios o partes de edificios que se reformen o amplíen (rehabilitación energética) según alguno de los siguientes supuestos:
 - a. Sustitución, instalación o renovación de las instalaciones térmicas que requieran de la redacción o modificación de un proyecto de instalaciones térmicas.
 - b. Intervención en más del 25% de la superficie total de la envolvente térmica final del edificio.
 - c. Ampliación de más de un 10% de la superficie o volumen de la unidad o unidades de uso sobre las que se intervenga. Siempre y cuando la superficie útil total ampliada supere los 50 m².
5. Edificios o partes de edificios con una superficie útil total superior a 500 m² destinados a uso: administrativo, sanitario, comercial, residencial público, docente, cultural, actividades recreativas, restauración, transporte de personas, deportivos y lugares de culto.
6. . Edificios que tengan que realizar obligatoriamente la ITE o inspección equivalente.

2.3.2 *Envolvente térmica*

En un edificio debe predominar la búsqueda de un equilibrio entre el confort interior y la eficiencia energética. La envolvente térmica es uno de los factores clave que influyen en dicho equilibrio.

El comportamiento energético de un edificio consiste en el intercambio de calor que se produce entre los espacios interiores habitables y el ambiente exterior a través de su envolvente térmica. Esta envolvente está formada por todos los cerramientos opacos verticales y horizontales, huecos y puentes térmicos del edificio y su eficiencia energética depende de su adecuado diseño y construcción, teniendo en cuenta el perfil de uso del edificio y la zona térmica donde se ubica este.[20]

La envolvente térmica de un edificio contiene todos los espacios interiores habitables, y los separa del ambiente exterior, ya que se compone de todos los cerramientos, horizontales y verticales, los huecos y los puentes térmicos del edificio.

El CTE permite incluir espacios no habitables dentro de la envolvente térmica, en el caso de ser necesitado. Se entiende por recintos no habitables los trasteros, desvanes, zonas comunes y garajes, y se consideran espacios no habitables el espacio formado por uno o varios recintos contiguos no habitables con condiciones térmicas similares.[21]

La envolvente térmica de los edificios se compone de:

- **Cerramientos opacos:** muros suelos y cubiertas
- **Huecos:** vidrios y marcos
- **Puentes térmicos**

El comportamiento energético de cada uno de ellos depende de:

- **Sus características geométricas**
- **Su composición:** capas de materiales que componen el elemento
- **Sus propiedades características:** espesor, conductividad, calor específico, densidad.

Según la estructura del DB-HE 2019 HE1[22], la condiciones para el control de la demanda energética son las siguientes:

1. Transmitancia de la envolvente térmica (K)
2. Control solar de la envolvente térmica (qsol; jul)
3. Permeabilidad al aire de la envolvente térmica (n50 / Q100L)

La zona climática, como se puede ver en la Figura 2-4, es uno de los criterios que más influyen en el comportamiento energético ya que se produce una interacción a través de la envolvente térmica con el exterior, intercambiando calor con el entorno. Por ello, es lógico que una infraestructura situada en la costa de la península no tiene el mismo comportamiento térmico que otra infraestructura situada en la Sierra de Madrid.

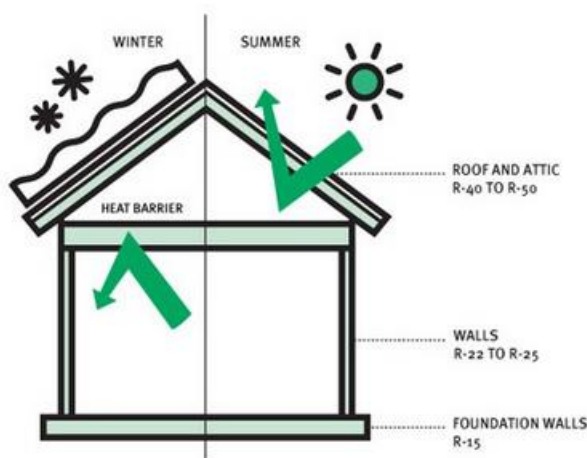


Figura 2-4 Zona climática[20]

El Código Técnico define zona climática, como la zona para la que se determinan unas solicitaciones exteriores comunes a efectos de cálculo de la demanda energética. Las zonas climáticas se clasifican tal y como aparece en la Figura 2-5 por su severidad climática de invierno y de verano, asignando una letra y un número respectivamente: B3 por ejemplo para Valencia.[23]

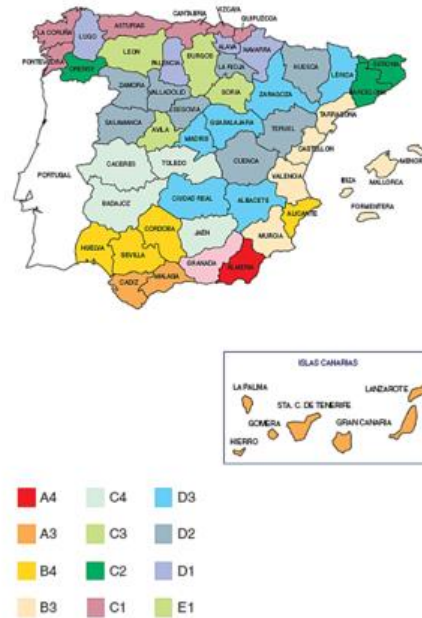


Figura 2-5 Mapa nacional de zonas climática[23]

2.3.3 Confort térmico

El confort térmico es una sensación neutra de la persona respecto a un ambiente térmico determinado. Según la norma ISO 7730 el confort térmico "es una condición mental en la que se expresa la satisfacción con el ambiente térmico". Depende de varios parámetros globales externos, como la temperatura del aire, la velocidad de este y la humedad relativa, y otros específicos internos como la actividad física desarrollada, la cantidad de ropa o el metabolismo de cada individuo. [24]

Para alcanzar dicha sensación de confort, el balance entre las ganancias y pérdidas de calor debe de ser nulo, conservando así la temperatura media, básicamente cuando se alcanza el equilibrio térmico. Los intervalos de los parámetros representados en las Cartas Bioclimáticas que se estudiará en este trabajo y que se interrelacionan entre sí para alcanzar el confort térmico son los siguientes:

- Temperatura del aire ambiente: 18°-26°
- Humedad relativa: 40%-65%
- Velocidad del aire: 0-2 m/s

Los diagramas bioclimáticos también denominados cartas bioclimáticas son sistemas de representación gráfica de las relaciones entre las diferentes variables térmicas que influyen en la sensación del confort térmico. Resumiendo, son una serie de diagramas que relacionan los parámetros que se ha nombrado previamente como temperatura y humedad, y según los índices térmicos establecen las condiciones de confort.

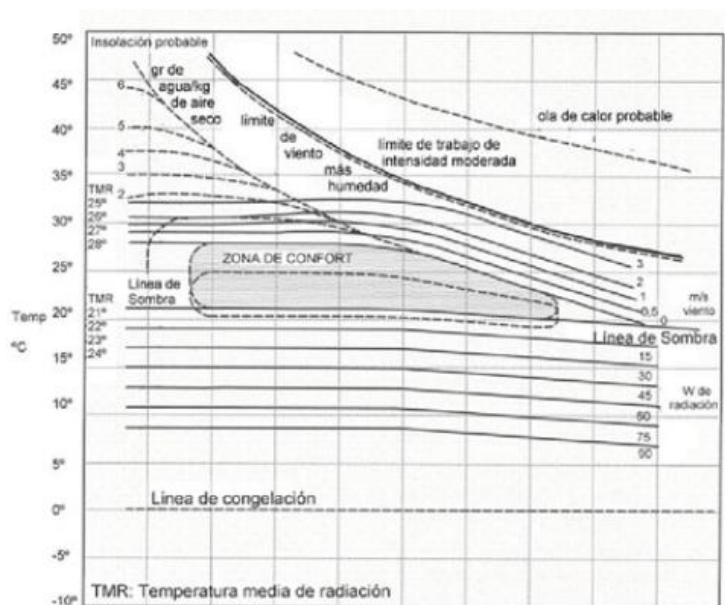


Figura 2-6 Carta Bioclimática de Olgyay[25]

La Figura 2-6 representa la Carta Bioclimáticas de Olgyay[25], siendo esta una de las cartas bioclimáticas más habituales. Dicho diagrama contiene un eje de abscisas que representa la humedad relativa y el eje de coordenadas contiene la temperatura. Como se observa en la carta, se aprecia una zona de confort dentro de la cual con esos intervalos de humedad y temperatura el cuerpo humano tiene una sensación térmica agradable. Cabe destacar, que, al no tener las mismas condiciones exteriores a lo largo del año, se emplean tres diferentes climogramas que se corresponden con: verano, invierno y primavera.

2.4 Normativa en edificación

2.4.1 Código Técnico de Edificación (CTE)

Las normas que regulaban el sector de la edificación desde 1957, eran competencia del Ministerio de Vivienda. Esta reglamentación era desarrollada por la Dirección General de Arquitectura del Ministerio de Gobernación, creada en 1937.

Dichas reglas se convirtieron en las Normas Básicas de la Edificación (NBE) en 1977, cuya aplicación era de obligado cumplimiento para los agentes del sector. Las Normas Tecnológicas de la Edificación (NTE) que no tenía carácter obligatorio se añadieron más tarde a las NBE. Este conjunto de normas aprobadas en 1977 se completaba con las Soluciones Homologadas de la Edificación.

En cuanto a reglamentación era necesario llevar a cabo una actualización ya que había quedado demasiado obsoleta, por lo que con la finalidad de regular el sector de la edificación se publica en 1999 la ley 38/1999.

"El Código Técnico de la Edificación (CTE) es el marco normativo que establece las exigencias que deben cumplir los edificios en relación con los requisitos básicos de seguridad y habitabilidad establecidos en la Ley 38/1999 de 5 de noviembre, de Ordenación de la Edificación (LOE)".[26]

En este código se dispone de diversos documentos relacionados con el ahorro energético mediante la fijación de normas y procedimientos para dicha finalidad. Se proporcionan una serie de exigencias básicas en cuanto a seguridad y habitabilidad. Busca ser la respuesta a la demanda social de mejorar la calidad de construcción y de fomentar el desarrollo sostenible y establece las funciones y responsabilidades de los actores involucrados, así como las garantías para el desarrollo de este proceso.

"El Código Técnico de la Edificación (CTE), es el marco normativo que establece y desarrolla las exigencias básicas de calidad de los edificios, sus instalaciones fijas y el equipamiento propio, así como los elementos de urbanización que permanezcan adscritos a los edificios, permitiendo demostrar que se satisfacen los requisitos básicos de la edificación que establece la Ley. "

El CTE se publica mediante el Real Decreto 314/2006 de 17 de marzo, tras la cual se han realizado diferentes actualizaciones.

El Código Técnico de la Edificación está dividido en dos partes. La primera parte esta subdividida según las distintas áreas que deben regularse. La segunda parte la forma las Documentos Básicos (DB) que son los siguientes:

- **DB SE:** Seguridad estructural
Constituye la base para cuya correcta aplicación son necesarios igualmente los siguientes cinco documentos:
 - **DB SE-AE:** Acciones en la edificación
 - **DB SE-A:** Estructuras de acero
 - **DB SE-F:** Estructuras de fábrica
 - **DB SE-M:** Estructuras de madera
 - **DB SE-C:** Cimentaciones
- **DB SI:** Seguridad en caso de incendio
- **DB SUA:** Seguridad de utilización y accesibilidad
- **DB HE:** Ahorro de energía
- **DB HR:** Protección frente al ruido
- **DB HS:** Salubridad

Cabe destacar el DB HE que tiene como objetivo establecer los procedimientos para desempeñar las exigencias del ahorro energético. Este documento básico es apoyado por los siguientes Documentos de Apoyo (DA):

- **DA DB-HE/1:** Cálculo de parámetros característicos de la envolvente
- **DA DB-HE/2:** Comprobación de limitación de condensaciones superficiales e intersticiales en los cerramientos
- **DA DB-HE/3:** Puentes térmicos
- **DA Climas referencia:** Documento descriptivo climas de referencia

2.4.2 Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios (RITE)

“El Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios, en adelante RITE, tiene por objeto establecer las exigencias de eficiencia energética y seguridad que deben cumplir las instalaciones térmicas en los edificios destinadas a atender la demanda de bienestar e higiene de las personas, durante

su diseño y dimensionado, ejecución, mantenimiento y uso, así como determinar los procedimientos que permitan acreditar su cumplimiento.”[27]

Las exigencias que establece el Real Decreto se plasman en:

- Mayor Rendimiento Energético en los equipos de generación de calor y frío
- Mejor aislamiento en los equipos y conducciones de los fluidos térmicos.
- Utilización de energías renovables disponibles, en especial la energía solar y la biomasa.
- Desaparición gradual de equipos generadores menos eficientes.
- Mejor regulación y control para mantener las condiciones de diseño previstas en los locales climatizados.

“A efectos de la aplicación del RITE se considerarán como instalaciones térmicas las instalaciones fijas de climatización (calefacción, refrigeración y ventilación) y de producción de agua caliente sanitaria, destinadas a atender la demanda de bienestar térmico e higiene de las personas.”

2.5 Simulación térmica de edificios

La actual normativa española (CTE – Código Técnico de la Edificación; RITE – Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios y Real Decreto 47/2007 de Certificación Energética de Edificios de Nueva Construcción), surgen como consecuencia de las directivas europeas SAVE y EPBD para limitar la emisión de gases de efecto invernadero en lo que respecta a los edificios y así mitigar el calentamiento global y fomentar la eficiencia energética de los edificios.[28]

Una de las consecuencias de esta normativa es el desarrollo de diferentes programas con el fin de verificar el cumplimiento de dicha normativa. Todo esto conlleva, debido al desarrollo tecnológico del sXXI, a que se lleven a cabo estas simulaciones térmicas a través del uso de ordenadores personales.

Una de las principales y obvias ventajas es que es considerablemente más económico realizar una estimación del consumo energético de un edificio con el ordenador que realizar una medición real de lo que consume un edificio durante un período determinado de tiempo.

El objetivo de las simulaciones térmicas es conocer durante un periodo de tiempo dado una determinada característica energética o de regulación del sistema. El objetivo suele ser la optimización de algún resultado con el fin de limitar las emisiones de CO₂. Hay que tener siempre en cuenta que la optimización tiene una serie de restricciones que influyen en el objetivo. Por ejemplo, si un edificio no tiene calefacción ni refrigeración, dicho edificio no tendrá emisiones de CO₂, pero la personas que desarrollen su vida dentro de él se sentirán contrariadas con las condiciones interiores.

2.5.1 Simulación térmica de edificios

Se trata de estimar el comportamiento térmico de las diferentes zonas que conforman el edificio y las prestaciones que están dando las máquinas en las condiciones de trabajo puntuales en cada instante de tiempo, con el fin de integrarlas durante el periodo de tiempo simulado.

2.5.2 Necesidad de procedimientos de simulación

La demanda de cada una de las contribuciones es como todo, variable con el tiempo y depende de las condiciones ambientales, tipo de edificio, características térmicas o zona climática como se ha

mostrado en la figura 2-5. También hay que tener en cuenta el concepto de inercia térmica, que es la velocidad con la que cualquier mínima variación de las condiciones ambientales produce sobre las condiciones térmicas interiores de cualquier edificio y con ello su demanda. Este concepto no debería ser nunca despreciable y causa la necesidad de la simulación térmica para estar lo más cerca posible de la demanda real.

Los equipos varían sus prestaciones a medida que lo hacen las condiciones ambientales y también con la proporción de carga que compensan en un cierto instante sobre sus prestaciones nominales, con lo que, igualmente un procedimiento estacionario solo produce una aproximación al consumo real.

Estas han sido las razones que han llevado a la legislación española a establecer una serie de procedimientos de simulación térmica de edificios para la certificación energética, y además de la posibilidad de conocer la columna vertebral de las simulaciones térmicas.

2.5.3 Partes del proceso de simulación matemático

Resumiendo, una simulación consiste en realizar de forma cronológica una predicción sobre el comportamiento de un individuo u objeto mediante el uso de un ordenador. Anteriormente la cronología se obtenía mediante un tiempo de maestro fijo, pero la nueva tendencia se está orientando hacia la “simulación por eventos discretos”.

Los programas de simulación están organizados de la siguiente manera:

- **Pretratamiento:** fase en la que se realiza la representación mediante softwares CAD del objeto que se pretende simular en modelo-D. Es una fase costosa por el tiempo necesario y la necesidad de conocimientos previos.
- **Simulación:** generación del modelo-S (simulación) matemático que simula el comportamiento mediante el registro de cierta información periódicamente.
- **Postratamiento:** consiste en la representación de los resultados obtenidos.

2.6 Softwares utilizados

2.6.1 SketchUp

SketchUp (anteriormente Google SketchUp) es un programa de diseño gráfico y modelado en tres dimensiones (3D) basado en caras. Es utilizado para el modelado de entornos de planificación urbana, arquitectura, ingeniería civil, diseño industrial, diseño escénico, GIS, videojuegos o películas. [10]. Este programa tiene la finalidad la realización de diseños y modelados en 3D de la manera más sencilla posible. Nos facilita la conceptualización y modelación de imágenes en 3D de cualquier tipo de objeto. Cabe destacar todas las posibilidades y los diferentes “plugins” que ofrece ya que nos ofrece un mayor marco de actuación en cuanto a sus funcionalidades.[29]



Figura 2-7 Logo SketchUp (página web SketchUp)[30]

2.6.2 OpenStudio

Es una colección de herramientas de software gratuito y de código abierto para el análisis energético de edificios mediante el uso de Energy Plus. Las aplicaciones OpenStudio se ejecutan en plataformas Microsoft Windows, Linux y Macintosh.[31]



Figura 2-8 Logo OpenStudio (Página web OpenStudio)[31]

2.6.3 Energy Plus

Es un programa de simulación térmica desarrollado en 1996 en EE. UU. por el Departamento de Energía (DOE) con la finalidad de simular el nivel energético de determinados parámetros de un edificio. El objetivo de este programa es llevar a cabo el desarrollo y la organización de herramientas de software que puedan trabajar tanto por separado como de forma conjunta. No existe una interfaz que permita a los usuarios visualizar el edificio. Este programa permite implementar la transferencia de aire humedad y calor, incluido el tratamiento de la transferencia de calor por radiación y convección por separado para respaldar el modelo de sistemas radiantes y el cálculo de métricas de confort térmico como se ha comentado en subapartados anteriores, y el cálculo de iluminación, el sombreado y las métricas de confort visual y no menos importante la configuración flexible a nivel de componentes de HVAC. [32]



Figura 2-9 Logo Energy Plus (página web Energy Plus)[32]

2.6.4 GenOpt

GenOpt es un programa de optimización utilizado para la minimización de una función que es evaluado por un programa de simulación externo como Trnsys, Dymola, IDA-ICE o como en este caso se utilizará EnergyPlus. Ha sido desarrollado para problemas de optimización donde la función es absolutamente costosa y sus derivados no están disponibles o probablemente ni siquiera existan.

GenOpt se puede acoplar a cualquier programa de simulación que lea su entrada de archivos de texto y escribe su salida en archivos de texto. Las variables independientes pueden ser variables continuas, discretas o ambas.



Figura 2-10 Página web GenOpt[33]

3 DESARROLLO DEL TFG

3.1 Descripción del caso de estudio

En este apartado se comenzará con una breve reseña y antecedentes de la Escuela Naval Militar y una descripción del edificio sobre el cual se va a realizar la simulación térmica, el edificio Isaac Peral. El trabajo se centrará en la simulación del aula 40, que está ocupada durante el horario de clases por alumnos de 4º curso, y el aula 50 que está ocupada por el 1º curso tanto las horas de clase como las horas en las que estos alumnos tienen estudio tutorizado como se especificará más adelante.

3.1.1 Escuela Naval Militar

La Escuela Naval Militar está situada en la soleada villa de Marín y es el único centro de formación de oficiales de los cuerpos de Infantería de Marina, Cuerpo General de la Armada e Intendencia.

En el año 1869, Juan Bautista Topete que era el ministro de Marina por aquella época, estableció la Escuela Naval flotante en la fragata Asturias (mostrada en la Figura 3-1) siendo su primer Director el Capitán de Navío Victoriano Sánchez Barcáiztegui. Esta estuvo activa hasta 1907, cuando se decidió la vuelta de la Escuela Naval a San Fernando (Cádiz) en la que durante la Guerra Civil se impartieron clases a oficiales de la Reserva Naval y a alféreces del Cuerpo de Infantería de Marina.

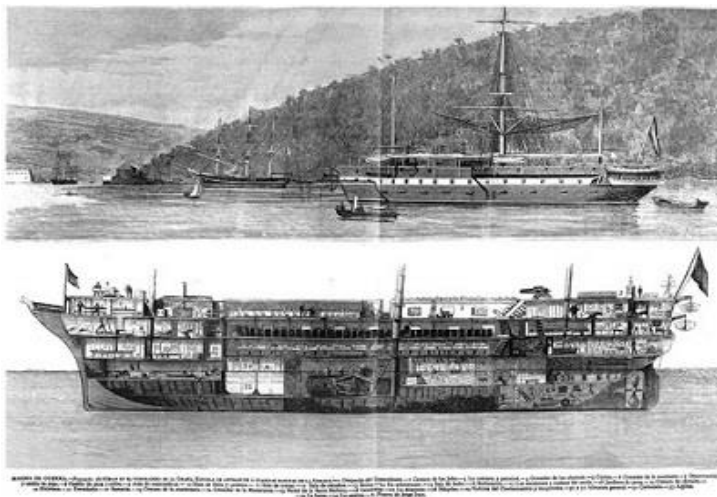


Figura 3-1, Fragata Asturias, página web Armada Española.[34]

En 1938 se trasladó la Escuela Naval Militar al sitio que hoy le corresponde, elegido por las condiciones idóneas de la ría de Pontevedra para las prácticas de navegación tan necesarias para el adiestramiento de los alumnos de Cuerpo General y por las facilidades que ofrece tanto la vegetación como los montes gallegos a las prácticas de los infantes de Marina.



Figura 3-2, Puerta de Carlos I (ENM, autoría propia)

3.1.2 Edificio Isaac Peral

Este edificio situado en la parte este de la ENM, debe su nombre a un marino español que fue el inventor del primer submarino a propulsión eléctrica al que llamó submarino Peral. Este edificio que se encuentra a lo largo de muelle Almirante Vierna como se puede comprobar en la Figura 3-3, localizado en las coordenadas geográficas de latitud: 42° 23' 40'' y longitud: 8° 42' 22''.



Figura 3-3. Escuela Naval Militar. [35]

Este edificio alberga numerosos laboratorios y aulas en los cuales los futuros oficiales de la Armada realizan sus numerosas actividades durante las largas jornadas diarias de lunes a viernes y los fines de semana realizan sus estudios los alumnos de primer curso. Fue construido en 1960 momento en el cual disponía de diferentes aulas orientadas al uso de motores y máquinas, hasta 1979 cuando tuvo lugar la primera reforma de este. La implantación del Proceso de Bolonia en España, siendo la Armada Española la academia pionera en poner en marcha el Nuevo Modelo de Enseñanza en el curso 2010/11 conllevaba la necesidad de un proceso de preparación que comenzó en los inicios del año 2000, época en la que la Escuela Naval Militar y la Dirección de Enseñanza Naval inician una serie de cambios encaminados a llevar este gran proceso a buen puerto.

Con esta finalidad se lleva a cabo un plan de infraestructuras.

En este plan de infraestructuras se tienen en cuenta las necesidades principales afrontando actuaciones a corto plazo entre las se destaca la siguiente:

“Adaptación de talleres y laboratorios del Edificio «Isaac Peral», muchos de ellos válidos y aprovechables dadas las enseñanzas impartidas anteriormente.”

Teniendo como resultado el edificio del que pueden disfrutar todos los alumnos de la Escuela Naval Militar hoy en día.

3.1.3 Aulas docentes estudiadas

La Figura 3-4 y Figura 3-5 muestran las aulas en las que se van a realizar las simulaciones térmicas, siendo estas el aula 40 en la planta baja y el aula 52 en la planta alta del edificio Isaac Peral.



Figura 3-4. Edificio Isaac Peral planta baja



Figura 3-5 Edificio Isaac Peral planta alta

La elección de las aulas del edificio Isaac Peral que se han elegido para realizar la simulación se ha realizado teniendo en cuenta los horarios semanales de los diferentes alumnos que van a ocupar dichas clases haciendo un seguimiento con la sábana que observamos en Figura 3-6 que nos proporciona Jefatura de Estudios cada semana. Se escoge un aula en cada planta y en zonas diferentes del edificio así como de cursos diferentes para tener la mayor representatividad posible.

Figura 3-6 Sábana del batallón de alumno (horario escolar)

3.2 Sistema de monitorización

3.2.1 Material utilizado

Se cita brevemente a continuación el material utilizado para la realización del sistema de monitorización de la temperatura y humedad relativa en las aulas docentes. Se explica con mas detalle su uso y funcionalidad.

- **Raspberry Pi 3:** es una especie de microordenador de reducido coste y formato compacto destinado para hacer accesible la informática a todos los usuarios. Hay que destacar su uso para desarrollar pequeños prototipos y su finalidad orientada a la formación informática y electrónico. Tiene una potencia limitada y algunas características diferentes a las de un ordenador convencional. El sistema operativo de la raspberry Pi OS se basa en una distribución GNU/Linux, específicamente en Debian. Dado que el sistema operativo Debian es de código abierto, se puede personalizar por quien quiera e instalar sin pagar licencias.

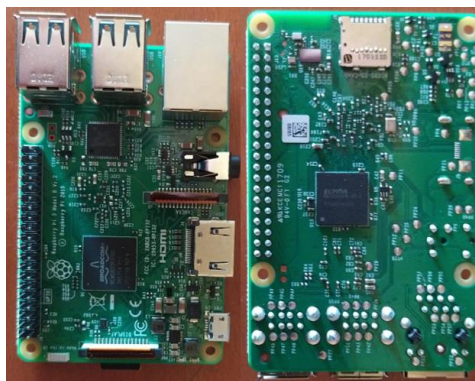


Figura 3-7. Raspberry Pi 3 (Autoría propia)

- **SHT31-D:** estos sensores de humedad relativa y temperatura son unos de los dispositivos mas precisos que se pueden obtener hoy en día. Disponen una interfaz I2C que permiten facilitar la lectura de datos. El sensor SHT31-D tiene una precisión de $\pm 2\%$ de humedad relativa y $\pm 0.3\%$ en la temperatura en la mayoría de los casos.

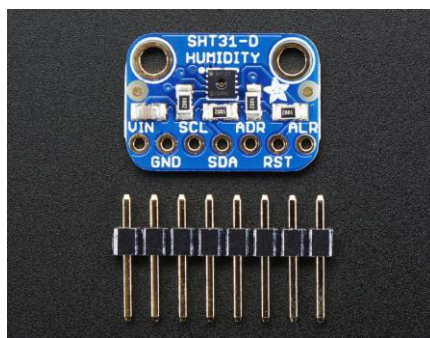


Figura 3-8 SHT31-D (Página web adafruit)[36]

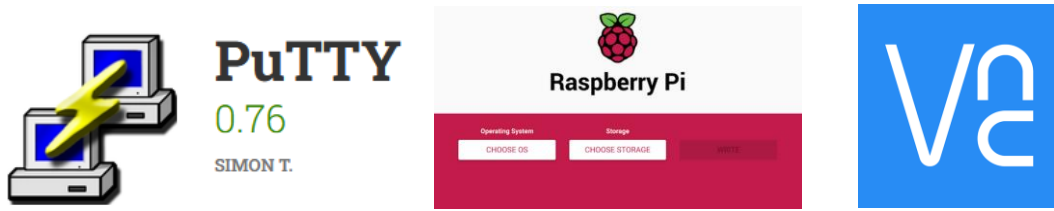
- **Tarjeta microSD 32GB Samsung:** necesaria para la programación de la raspberry para su posterior monitorización y registro de datos, obteniéndose estos en archivos csv.



Figura 3-9 Micro SD (Samsung)[37]

3.2.2 Desarrollo del sistema de registro de datos

Para el desarrollo del sistema de registro de los datos se ha comenzado con la preparación de la raspberry. Para ello, el primer paso ha sido la descarga de los siguientes programas necesarios para la utilización: PUTTY, raspberry software y VNC.



Este es el procedimiento que se ha llevado a cabo para conectar la raspberry al ordenador utilizando el cable ethernet. El primer paso que se realizó fue descargar el programa PUTTY desde la página web referenciada en la Figura 3-10.

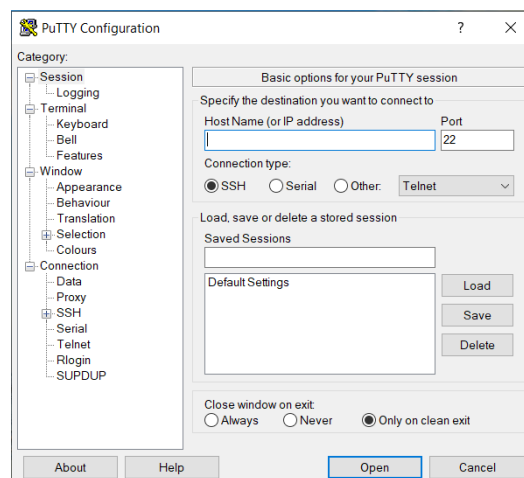


Figura 3-10. PUTTY. (Autoría propia)

Una vez se introduce el HostName de fábrica *raspberrypi.local*, dentro del terminal se ejecuta el siguiente código para descargar el software de raspberrypi OS:

```
$sudo apt install rpi-imager
```

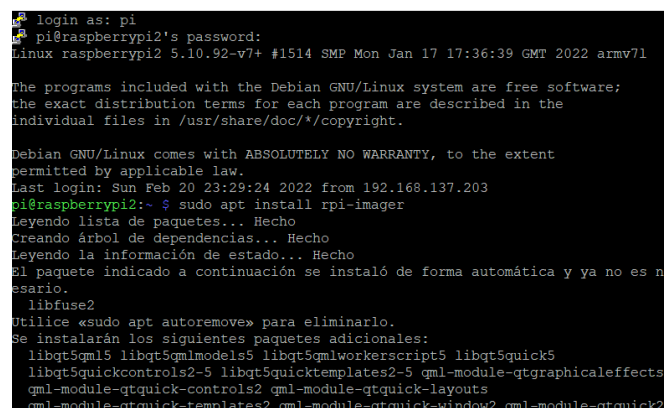


Figura 3-11 (Autoría propia)

Una vez descargado el raspberrypi, con la tarjeta microSD metida y reconocida en el ordenador, se guarda el software de la raspberry Pi.

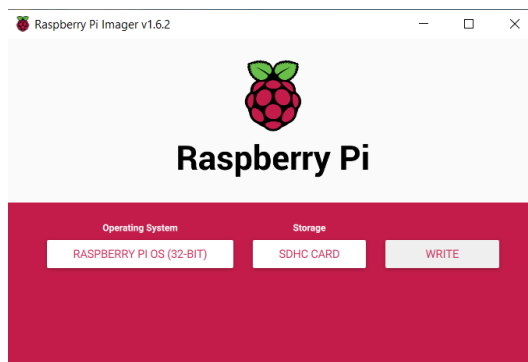


Figura 3-12 Página web raspberry(Autoría propia)

Tras esto, se abre el terminal de la aplicación PUTTY, y se ejecuta el siguiente comando con la finalidad de activar el servidor VNC:

```
$sudo raspi-config
```

→Interface Options→I3 VNC

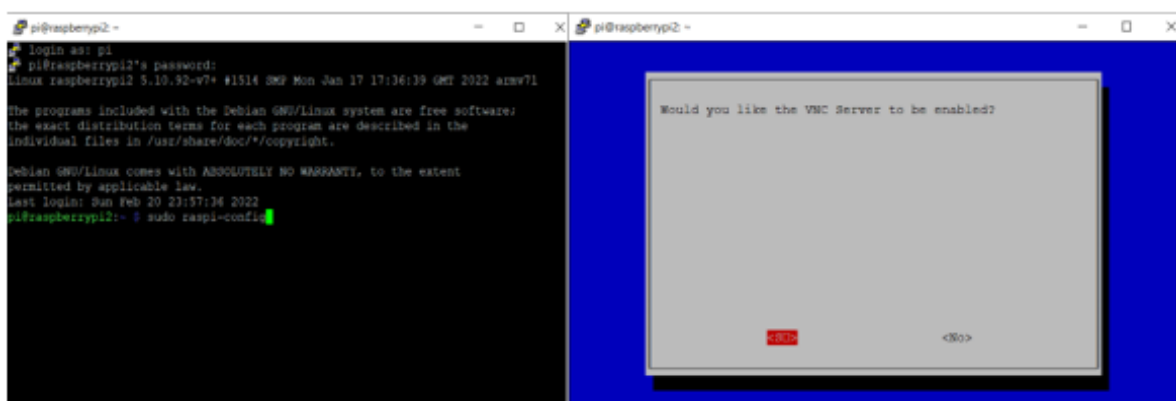


Figura 3-13 (Autoría propia)

En el terminal se introducen los siguientes comandos para descargar las herramientas necesarias para el uso actualizado y eficiente de la raspberry.

```
$ sudo apt-get update
$ sudo apt-get upgrade
$ sudo apt-get install python3-pip
$ sudo pip install --upgrade setuptools
$ cd ~
$ sudo pip install -upgrade adafruit-python-shell
$ wget https://raw.githubusercontent.com/adafruit/Raspberry-Pi-Installer-Scripts/master/raspi-blinka.py
$ sudo python3 raspi-blinka.py
```

3.2.3 Descarga Visual Studio Code

El Visual Studio Code es un editor de código fuente independiente que se ejecuta en Windows, macOS y Linux. Es la selección principal para desarrolladores web y JavaScript, con multitud de extensiones para admitir casi cualquier lenguaje de programación. [13]

Para la la instalación se ha ejecutado los siguientes comandos:

```
$ sudo apt update
```

```
$ sudo apt install code
```

A continuación, se muestra en la Figura 3-14 y Figura 3-15.

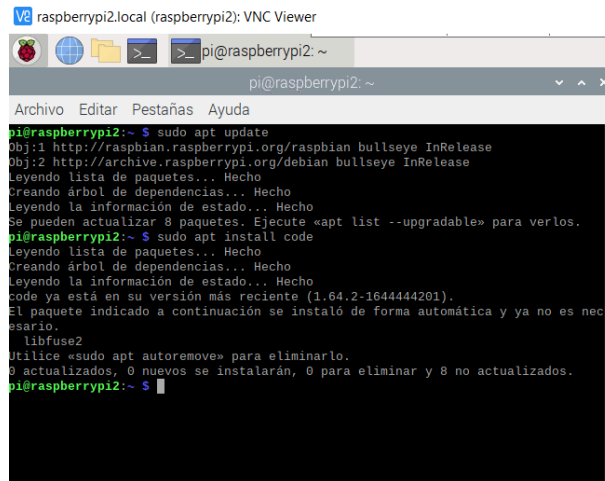


Figura 3-14 Autoría propia

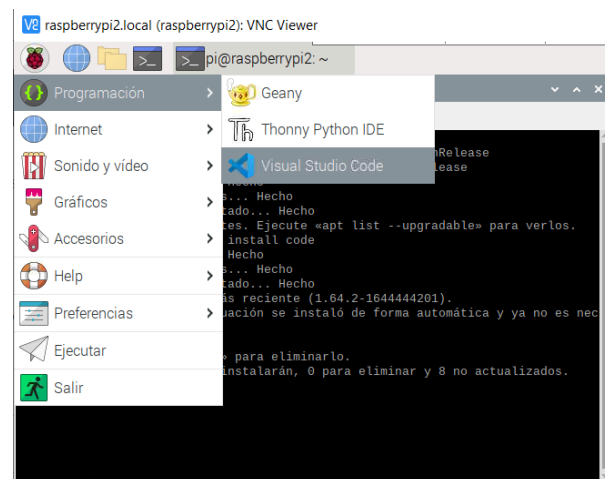


Figura 3-15 Autoría propia

3.2.4 Comprobación del SHT-31D mediante la obtención de datos desde el terminal

Para llevar a cabo la comprobación del correcto funcionamiento del sensor de temperatura y humedad relativa, se ha iniciado este proceso conectando la raspberry Pi al SHT-31D como se muestra en la Figura 3-16 :

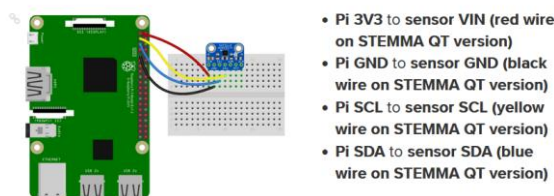
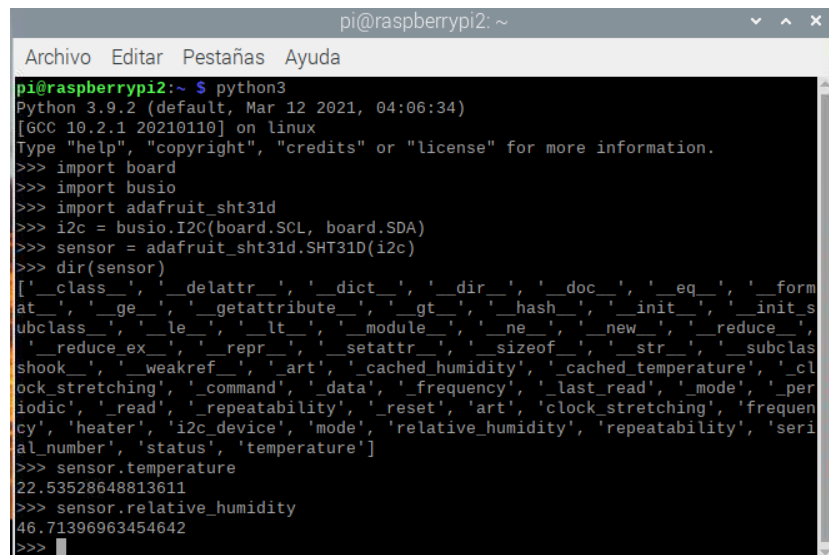


Figura 3-16 SHT-31D[36]

Una vez conectada la raspberry al SHT-31D, se procede la programación del sensor con la finalidad de obtener los valores de temperatura y humedad de las aulas del edificio Isaac Peral. Conseguido esto, se detallan específicamente los pasos seguidos para obtener dichos valores.

```
$ sudo apt install i2c-tools
$ i2cdetect -y 1
$ sudo pip install adafruit-circuitpython-sht31d
$ python3
$ import board
$ import busio
$ import adafruit_sht31d
$ i2c = busio.I2C( board.SCL , board.SDA)
$ sensor= adafruit_sht31d.SHT31D(i2c, 0x44)
$ dir(sensor)
```

Obteniendo como resultado la siguiente Figura 3-17:



```

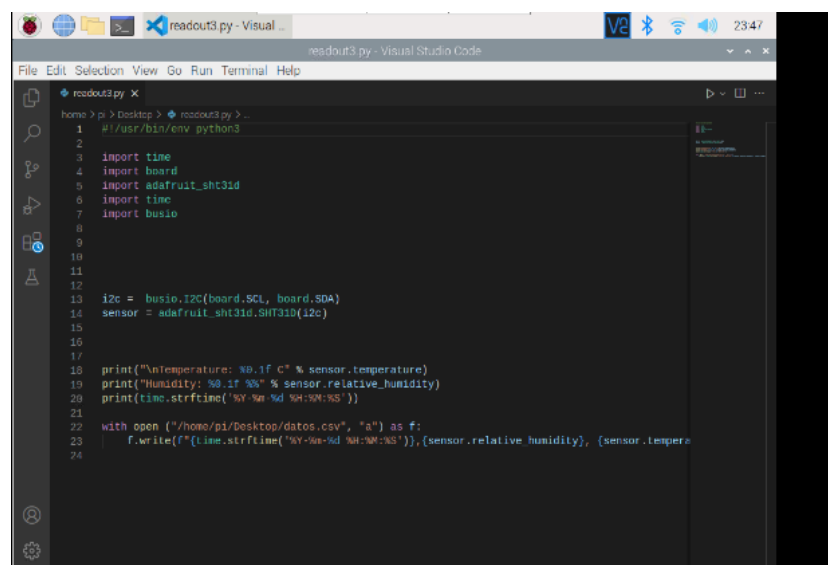
pi@raspberrypi2: ~
Archivo Editar Pestañas Ayuda
pi@raspberrypi2:~$ python3
Python 3.9.2 (default, Mar 12 2021, 04:06:34)
[GCC 10.2.1 20210110] on linux
Type "help", "copyright", "credits" or "license" for more information.
>>> import board
>>> import busio
>>> import adafruit_sht31d
>>> i2c = busio.I2C(board.SCL, board.SDA)
>>> sensor = adafruit_sht31d.SHT31D(i2c)
>>> dir(sensor)
['_class_', '_delattr_', '_dict_', '_dir_', '_doc_', '_eq_', '_form
at_', '_ge_', '_getattr_', '_gt_', '_hash_', '_init_', '_init_s
ubclass_', '_le_', '_lt_', '_module_', '_ne_', '_new_', '_reduce_',
'_reduce_ex_', '_repr_', '_setattr_', '_sizeof_', '_str_', '_subclas
shook_', '_weakref_', '_art_', '_cached_humidity', '_cached_temperature', '_cl
ock_stretching', '_command', '_data', '_frequency', '_last_read', '_mode', '_per
iodic', '_read', '_repeatability', '_reset', '_art_', '_clock_stretching', '_frequen
cy', '_heater', '_i2c_device', '_mode', '_relative_humidity', '_repeatability', '_seri
al_number', '_status', '_temperature']
>>> sensor.temperature
22.53528648813611
>>> sensor.relative_humidity
46.71396963454642
>>>

```

Figura 3-17 Autoría propia

3.2.5 Código

El objetivo principal de la programación realizada en Python era crear un código que permitiera obtener los datos de temperatura y humedad relativa de las dos aulas citadas anteriormente señalando la fecha y hora. Para la obtención de estos datos se ha considerado imprescindible que sean recogidos por los sensores cada diez minutos. Dichos datos son recogidos en un archivo .csv como posteriormente se comprobará en la validación de resultados.



```

readout3.py - Visual
readout3.py - Visual Studio Code
File Edit Selection View Go Run Terminal Help
readout3.py X
home > pi > Desktop > readout3.py >
1 #!/usr/bin/env python3
2
3 import time
4 import board
5 import adafruit_sht31d
6 import time
7 import busio
8
9
10
11
12
13 i2c = busio.I2C(board.SCL, board.SDA)
14 sensor = adafruit_sht31d.SHT31D(i2c)
15
16
17
18 print("\ntemperature: %.1f C" % sensor.temperature)
19 print("Humidity: %.1f %" % sensor.relative_humidity)
20 print(time.strftime('%Y-%m-%d %H:%M:%S'))
21
22 with open("/home/pi/Desktop/datos.csv", "a") as f:
23     f.write(f'{time.strftime("%Y-%m-%d %H:%M:%S")},{sensor.relative_humidity},{sensor.tempera
24

```

Figura 3-18 Autoría propia

3.2.6 Crontab

Cron es una palabra que viene del griego cuyo significado es “tiempo”. Su utilidad en esta programación está en que es un administrador de tareas que permite ejecutar comandos en un momento determinado, puede ser cada minuto, cada día, básicamente cuando se establezca.

El uso del crontab es el siguiente:

- \$ crontab -e editar el archivo crontab de un usuario
- \$ crontab -l listar el archivo crontab con sus tareas configuradas
- \$ crontab -r eliminar el archivo crontab, cuyo borrado no es recuperable

Como se ha dicho en el apartado anterior se ha configurado el crontab para recoger datos cada diez minutos. Se ha configurado como se aprecia en la Figura 3-19:

```

pi@raspberrypi2:~$ sudo crontab -l
# Edit this file to introduce tasks to be run by cron.
#
# Each task to run has to be defined through a single line
# indicating with different fields when the task will be run
# and what command to run for the task
#
# To define the time you can provide concrete values for
# minute (m), hour (h), day of month (dom), month (mon),
# and day of week (dow) or use '*' in these fields (for 'any').
#
# Notice that tasks will be started based on the cron's system
# daemon's notion of time and timezones.
#
# Output of the crontab jobs (including errors) is sent through
# email to the user the crontab file belongs to (unless redirected).
#
# For example, you can run a backup of all your user accounts
# at 5 a.m every week with:
# 0 5 * * 1 tar -zcf /var/backups/home.tgz /home/
#
# For more information see the manual pages of crontab(5) and cron(8)
#
# m h dom mon dow command
*/10 * * * * /home/pi/Desktop/readout3.py > /home/pi/Desktop/log.txt 2>&1
pi@raspberrypi2:~$

```

Figura 3-19 Autoría propia

3.3 Modelado de las aulas docentes del Isaac Peral

3.3.1 Simulación térmica

Los datos experimentales de temperatura y humedad relativa registrados en las raspberrys se compararán con los datos de temperatura y humedad relativa simulados térmicamente. Para llevar a cabo el modelado energético de las diferentes aulas, este trabajo se ha basado en un archivo osm. del edificio Isaac Peral realizado en SketchUp por el AN Ramos Gesteiro para el desarrollo de su TFG que se titulaba “SIMULACIÓN DE UN SISTEMA DE CLIMATIZACIÓN VRV EN UN EDIFICIO DE AULAS DE LA ESCUELA NAVAL MIITAR”. El modelo energético en OpenStudio ha partido de un modelo geométrico realizado con el software SketchUp al que se le han incluido construcciones, materiales y cargas térmicas. Como se ha citado previamente uno de los objetivos de este trabajo es hacer una simulación de las aulas 40 y 52 del edificio Isaac Peral aprovechando ese determinado archivo, pero haciendo una investigación más rigurosa de la realidad y poniendo el foco en las variables concretas de temperatura y humedad relativa.

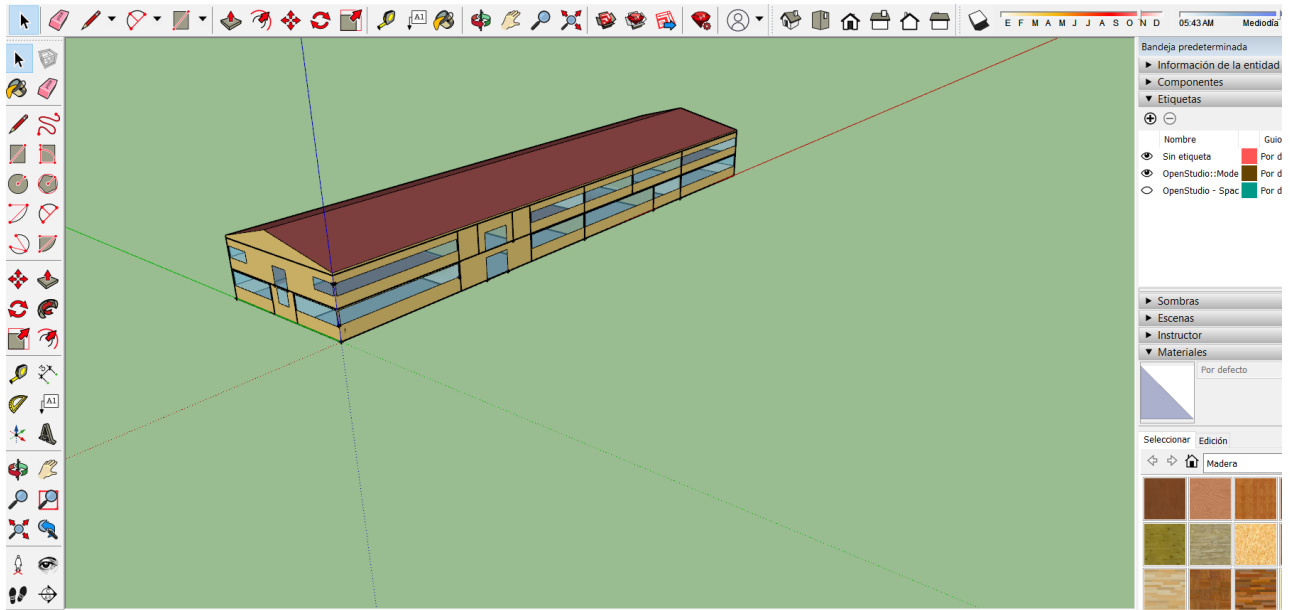


Figura 3-20 Modelado geométrico Isaac Peral

Se debe tener en cuenta para nuestro desarrollo que previamente se usó el script de usuario de OpenStudio para agregar diferentes zonas térmicas. En la Figura 3-21 se observan las diferentes zonas térmicas.

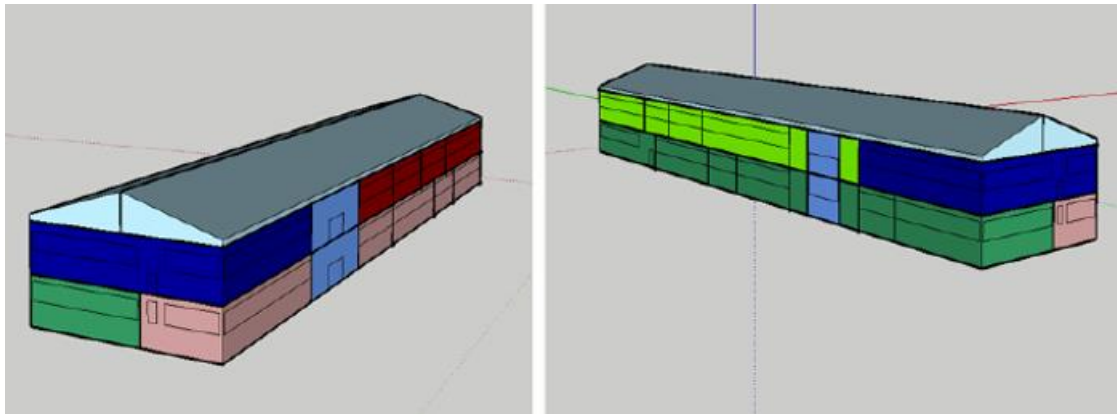


Figura 3-21 Zonas térmicas edificio simulado

3.3.1.1 Archivo meteorológico de la zona a estudiar

Antes de implementar la simulación térmica, se debe agregar un archivo meteorológico en formato epw. que nos proporcione la información de temperatura y humedad relativa, entre otras variables meteorológicas de los días en que se ha realizado la toma de datos mediante las raspberries y los sensores. Para ello se va a descargar de la página de Meteogalicia obteniendo los datos de temperatura y humedad relativa del mes de febrero y marzo del 2022.[38]

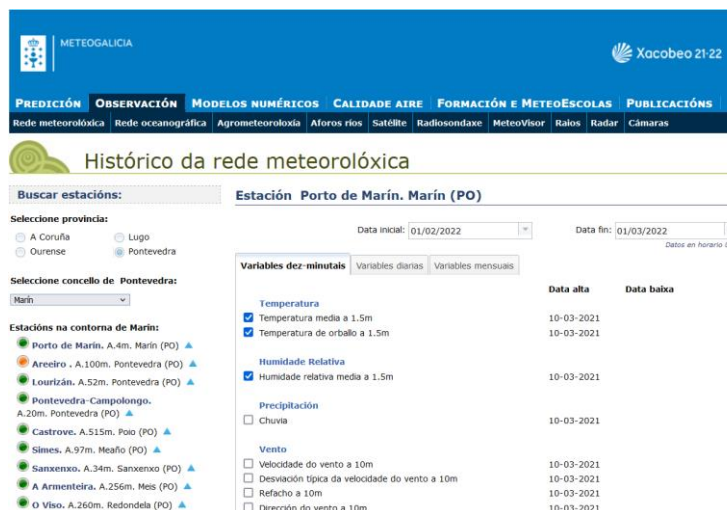


Figura 3-22 Datos Porto de Marín Meteogalicia[39]

Se descargará un archivo (csv.) que hay que transformar en (epw.), archivos con doble función: el archivo meteorológico y de localización.

Una vez con este archivo, ser hace clic en “Change Weather File” y se introduce al archivo (epw.) abriéndose así el archivo climático de Marín rellenándose automáticamente los campos de localización, longitud o elevación.

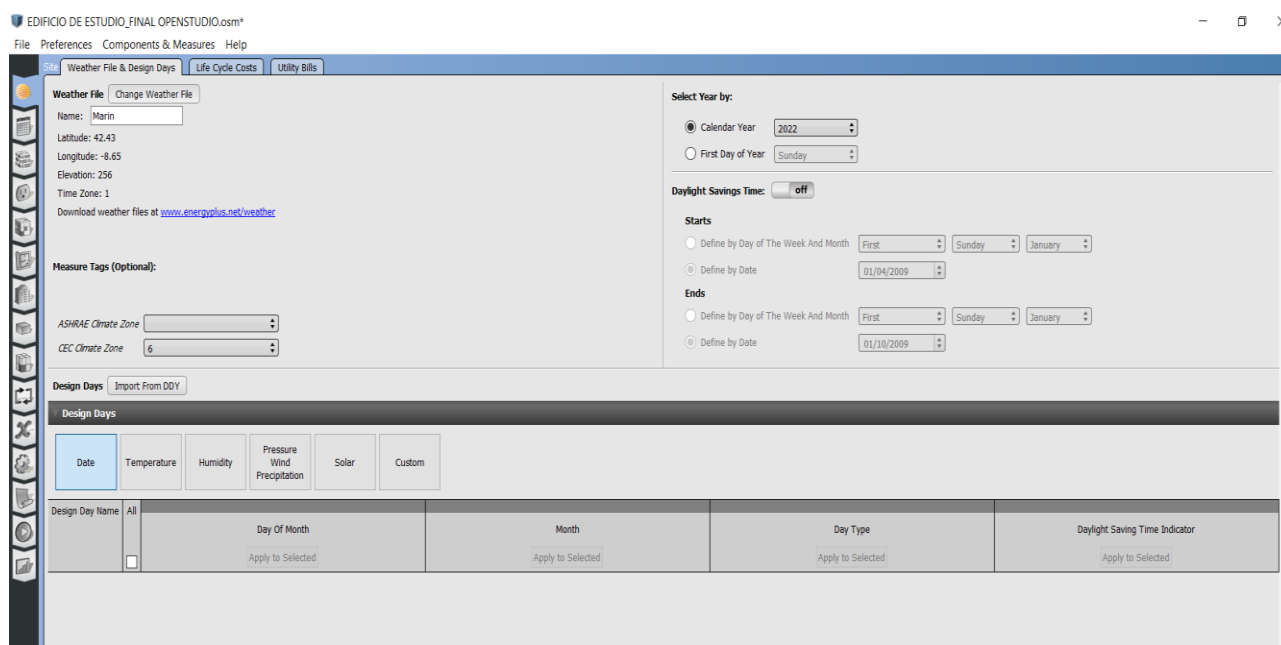


Figura 3-23 Weather File & Design Days (Autoría Propia)

3.3.1.2 Horarios y cargas térmicas asociadas

En este edificio se van a crear diferentes tipos de horarios, se va a establecer un horario ocupacional que va a coincidir con el horario lectivo de la Escuela Naval Militar como se puede observar en la Figura 3-25 y en la Figura 3-26.

En la pestaña “Schedule Sets” se concibe una colección de horarios para actividades. El horario se puede modificar a un edificio completo, a un tipo de espacio o un espacio individual como se hará posteriormente. La pestaña de la derecha tiene dos tipos de zonas de colocación, se puede colocar los horarios desde “Library” o “My model”, o colocar los horarios individuales en el cuerpo principal.

En “Schedules” se accede a un calendario visual para editar el horario de manera manual. Se dispone de una serie de reglas que se pueden aplicar para un determinado intervalo de fechas específico de la semana

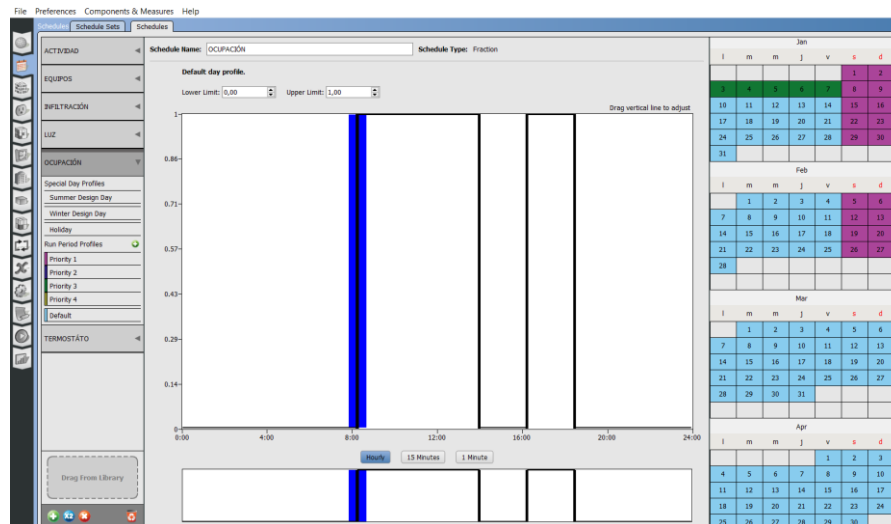


Figura 3-24 Schedules, ventana para explicación (Autoría Propia)

Hay que configurar las fechas y los diferentes valores en las gráficas. Cabe destacar que los horarios que se utilizan que son de tipo fraction usan unidades fraccionales con el fin de describir la actividad o el horario de una forma mas genérica.

Cada perfil comienza con una línea plana. El perfil se divide haciendo doble clic, arrastrando a su vez un segmento hacia arriba o hacia abajo dependiendo de nuestro horario. A su vez, los límites laterales también se pueden modificar hacia un lado o hacia otro y se hace clic en “upper limit” para cambiar los límites verticales del perfil. En la parte inferior del perfil se puede apreciar una vista más detallada en el que se puede ajustar el horario en intervalos de entre 15 hasta 1 minuto

Se han realizado dos horarios, uno para cada aula. El horario del aula 40, que es el aula utilizada por los Guardamarinas de 2º.

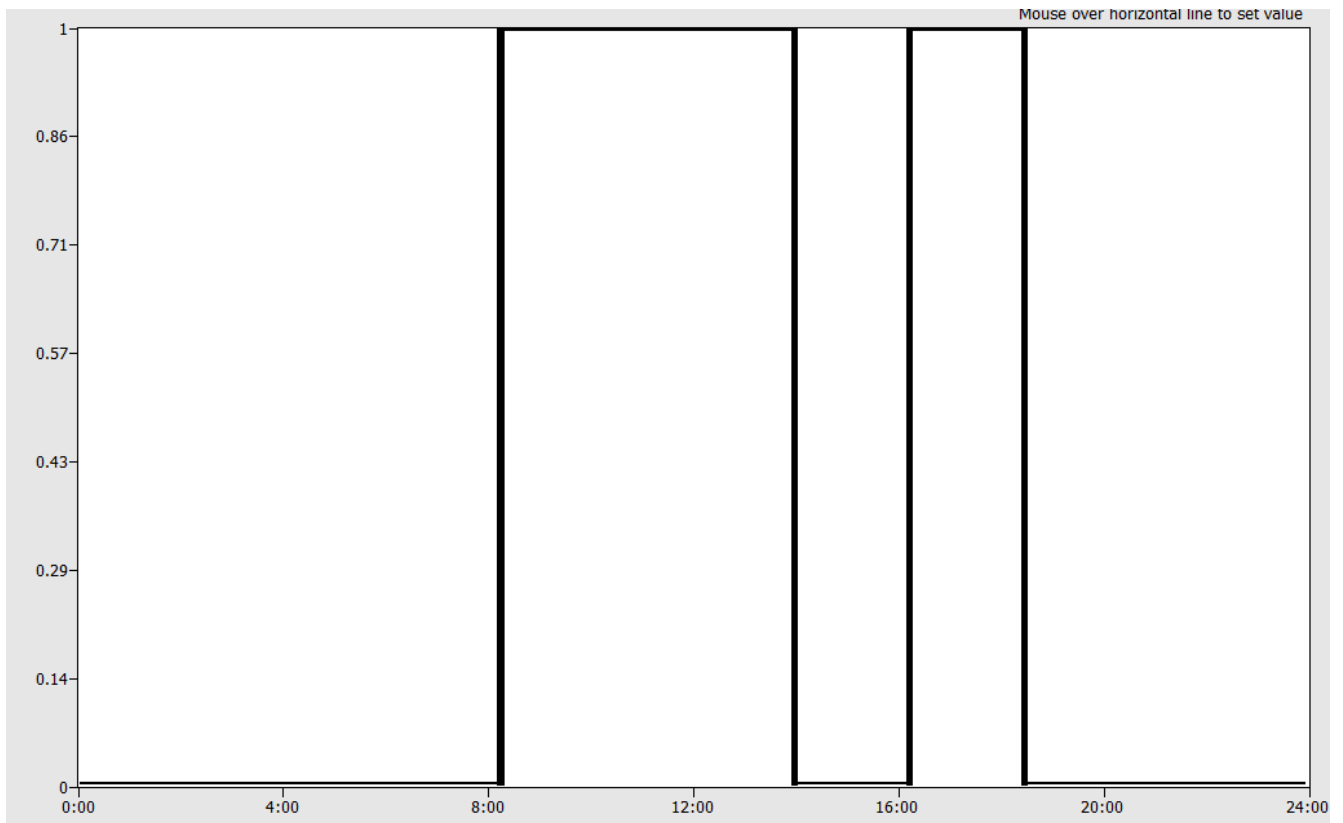


Figura 3-25 Ocupación Aula 40 Guardamarinas de 2º (Autoría Propia)

Que según la sábana que nos proporciona Jefatura de Instrucción ese aula la ocupan los grupos 5,6 e IM con un total de 29 personas desde las 0815 de la mañana, hora a la que empieza la jornada lectiva, hasta las 1400 hora en que los alumnos tienen el turno de comedor. Retoman las clases a las 1610 hasta las 1835.

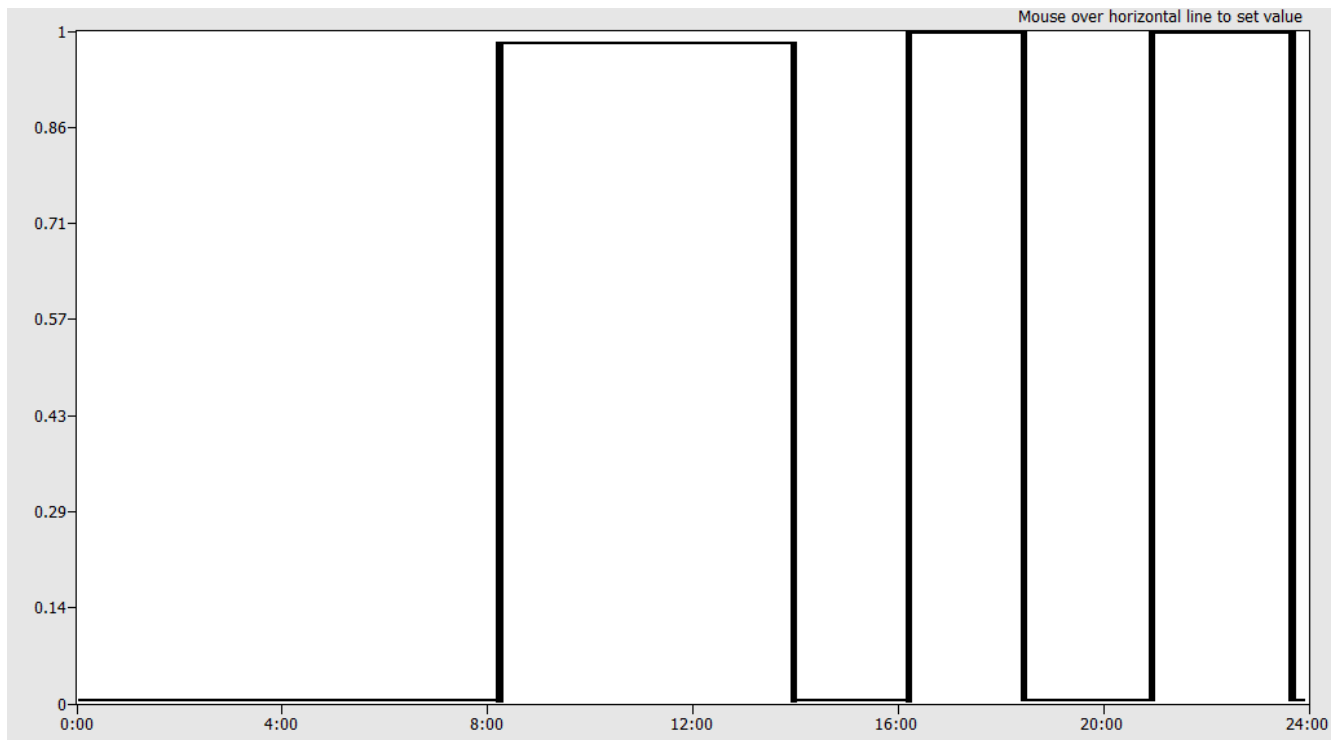


Figura 3-26 Ocupación Aula 52 Aspirantes de primero (Autoría Propia)

Por otra parte, el aula 52 la ocupan los aspirantes de primero (G5, G5, IM1 e IM2) siendo este horario igual que el de los alumnos de 4º curso, de 0815 a 1400 con descanso para comer y de 1610 a 1835 con un total de 39 personas. Solo dista que los Aspirantes de 1º tienen estudio después de cenar a las 2100 hasta las 0000.

3.3.2 Calibración

Aún sabiendo que el motor de cálculo ofrece buenos resultados para la simulación de determinadas instalaciones y edificios, el modelo debería ajustarse con el comportamiento real del edificio calculado previamente en este trabajo. Con esta finalidad se realizará la calibración de los datos simulados como se establece en los requisitos de *ASHRAE Guideline* para poder considerar que los edificios están calibrados. En este apartado se va a aplicar un modelo de calibración determinista. Dicho modelo se lleva a cabo cambiando una serie de parámetros que se han elegido que se verá en las figuras posteriores, pudiendo ser estos parámetros discretos o continuos, teniendo como finalidad la obtención de la minimización de la función objetivo la cual calcula las diferencias entre los datos experimentales y los datos simulados. La función de coste que se va a minimizar en este trabajo como se expone a continuación, es el coeficiente de variación del error cuadrático medio, CV(RMSE) mostrado en la Figura 3-27.

Como se ha explicado anteriormente, se realizó un periodo de medición para obtener los datos experimentales durante el mes de febrero y marzo, y con estos datos se calibrará dicho modelo.

Estos datos se han cogido en intervalos de diez minutos y el step de simulación es de una hora

Una vez obtenidos tanto los datos los experimentales de las dos aulas de la simulación con las raspberries y sensores de humedad relativa y temperatura como de los datos de la simulación, se comienza con la calibración. La finalidad de esta calibración es reducir la diferencia obtenida entre los datos experimentales y de la simulación del OpenStudio.GenOpt es el software de optimización elegido

para llevar a cabo dicha calibración. Este software se utiliza como herramienta de optimización de la función elegida, la ya nombrada CV(RMSE) Coefficient of Variation of the Root Mean Square:

$$CV(RMSE) = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (T_{sim} - T_{exp})^2 / n}}{\overline{T_{exp}}} \quad [40]$$

Figura 3-27 Optimización de la función error

- T_{sim} : es la temperatura simulada mediante OpenStudio
- T_{exp} : es la temperatura real registrada mediante las raspberries
- n : es el número de datos
- $\overline{T_{exp}}$: media de los valores experimentales

El algoritmo elegido es el GPS Hooke-Jeeves, un algoritmo híbrido para la optimización, que comienza con valores iniciales arbitrarios y continúa restringiendo, minimizando el error para obtener una mayor precisión en los resultados. Durante el proceso de optimización, el software continúa modificando las variables que se han establecido como son en este caso el espesor de los diferentes materiales de las paredes de las aulas estudiadas, determinando en cada iteración que se ha realizado si el error se ha minimizado o no, y se alcanzaría el resultado óptimo cuando la función error obtiene valores iguales durante cinco iteraciones consecutivas. Para la validación del modelo, se van a seguir los criterios de *ASHRAE Guideline*[41], en el que se establece que la simulación de un edificio se puede considerar calibrado cuando el modelo tiene un CV(RMSE) del 15% en cuanto a calibraciones con datos mensuales, pero si la recopilación de datos es horario este será del 30%. El problema que se considera común en estas calibraciones es la gran cantidad de parámetros que deben de variarse, pero al haber elegido un único parámetro no debería causar inconvenientes inicialmente. Por lo que el número de iteraciones necesarias para obtener la optimización debería de reducirse significativamente.

Como se ha dicho previamente, tras la obtención de tanto los datos experimentales como los de simulación, se comienza con uno de los objetivos principales de este TFG que es la calibración de dichas temperaturas y humedades relativas con el software Genopt.

Para la calibración, se utilizan una serie de archivos (que posteriormente se ilustran) y que son necesarios para ejecutar la calibración. Para esta optimización se ha buscado uno de entre todos los materiales de los que están formado el Edificio Isaac Peral como se observa en la Figura 3-28. De entre todos los materiales se ha decidido escoger la *Cámara de Aire Paredes*, perteneciente a las paredes exteriores de todo el Isaac Peral, y por tanto de las aulas 40 y 52.

Space Name	Surface Name	Surface Type	Construction	Outside Boundary Condition	Outside Boundary Condition Object	Sun Exposure	Wind Exposure	Surface Rendering Name
almacenamiento planta baja	Surface 46	Wall	PARED EXTERIOR	Surface	Surface 27	Default	WindExposed	Rendering Case 18
	Surface 47	Wall	PARED EXTERIOR	Surface	Surface 28	Default	WindExposed	RECORRIDO DE STACCO
	Surface 48	Roof/Ceiling	PARED EXTERIOR	Surface	Surface 136	Default	WindExposed	Layer
	Surface 49	Wall	PARED EXTERIOR	Outdoors	Surface 29	WindExposed	WindExposed	RECORRIDO PEDIDO
	Surface 50	Wall	PARED EXTERIOR	Surface	Surface 30	Default	WindExposed	Layer
aula 10 planta baja	Surface 51	Floor	AUTOMATICA DE LUGAR	Ground	Surface 52	Default	WindExposed	CAMARA DE AIRE PAREDES
	Surface 52	Wall	PARED EXTERIOR	Surface	Surface 31	Default	WindExposed	Layer
	Surface 53	Wall	PARED EXTERIOR	Outdoors	Surface 32	WindExposed	WindExposed	Layer
	Surface 54	Wall	PARED EXTERIOR	Surface	Surface 33	Default	WindExposed	LACERIAS
	Surface 55	Wall	PARED EXTERIOR	Surface	Surface 34	Default	WindExposed	Layer
aula 10 planta baja	Surface 56	Wall	PARED EXTERIOR	Surface	Surface 35	Default	WindExposed	RECORRIDO PEDIDO
	Surface 57	Wall	PARED EXTERIOR	Surface	Surface 36	Default	WindExposed	Add/Remove Extensible Groups
	Surface 58	Roof/Ceiling	PARED EXTERIOR	Surface	Surface 37	Default	WindExposed	On/Stand/Off/On/Off/On/Off/On/Off
	Surface 59	Wall	PARED EXTERIOR	Surface	Surface 38	Default	WindExposed	Construction Name
	Surface 60	Wall	PARED EXTERIOR	Surface	Surface 39	Default	WindExposed	PARED EXTERIOR

Figura 3-28 OpenStudio, material usado para optimización (Autoría Propia)

Con este material se van a hacer las iteraciones necesarias para conseguir la optimización. La optimización se refiere a reducir la función error entre la media de los datos experimentales sacados con las raspberry de las aulas 40 y 52, y la media de los datos obtenidos con la simulación realizada con

OpenStudio. Para ello se van a necesitar una serie de archivos que se detallan uno por uno a continuación. En la Figura 3-29 se muestra un vista general del proceso a realizar:

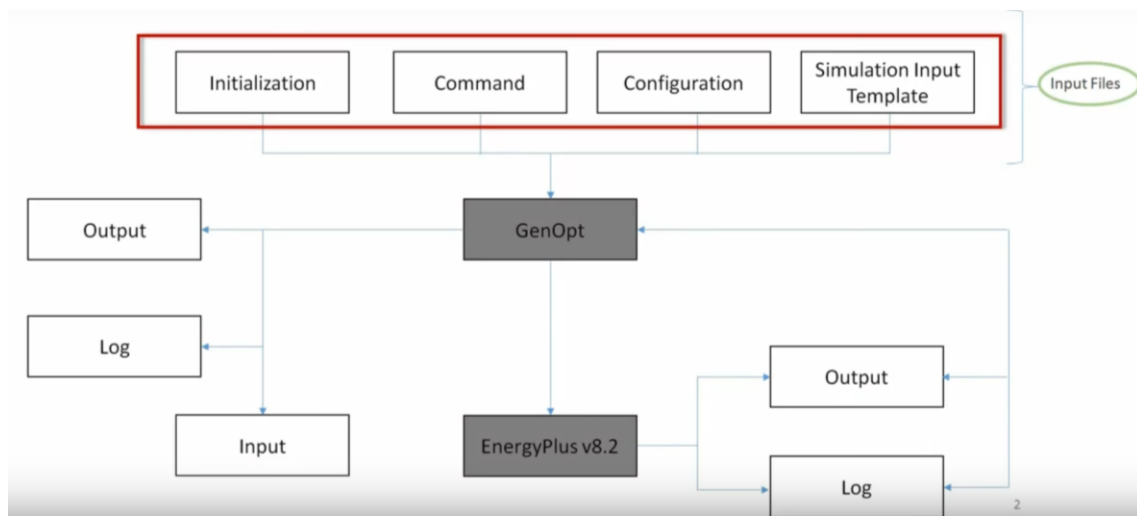


Figura 3-29 Vista general calibración (Autoría Propia)

El primer elemento es un archivo txt. llamado comand.txt en el que se especifica qué material es el que se va a ir modificando mediante las diferentes iteraciones que se van a ejecutar, la configuración de las iteraciones se muestra en el archivo como se puede ver en la Figura 3-30,

```

1
2
3
4 Vary(
5   Parameter: //MATERIAL THICKNESS
6   Name      = camara;
7   Min       =0.2;
8   Ini       =0.15;
9   Max       =0.6;
10  Step      =0.05;
11 )
12
13 OptimizationSettings{
14   MaxIte    = 2000;
15   MaxEqualResults = 100;
16   WriteStepNumber = false;
17   UnitsOfExecution = 0;
18 }
19
20 Algorithm{
21   Main = GPSHookeJeeves;
22   MeshSizeDivider = 2;
23   InitialMeshSizeExponent = 0;
24   MeshSizeIncrement = 1;
25   NumberOfStepReduction = 4;

```

Figura 3-30 Command.txt archivo para calibración (Autoría Propia)

Como se observa en los archivos y como se ha explicado anteriormente, el algoritmo elegido es el GPS Hooke-Jeeves, el cual durante el proceso de optimización, el software de calibración procede a modificar las variables que se van a estudiar siendo este el material *Cámara de Aire Paredes*. Tal y como se ha relacionado el archivo txt. con el archivo idf. hay que establecer entre signos porcentuales (%) el parámetro que se va a modificar de los diferentes materiales con la configuración de la iteración a realizar. Con la finalidad de determinar si en cada iteración la función error se reduce o no.

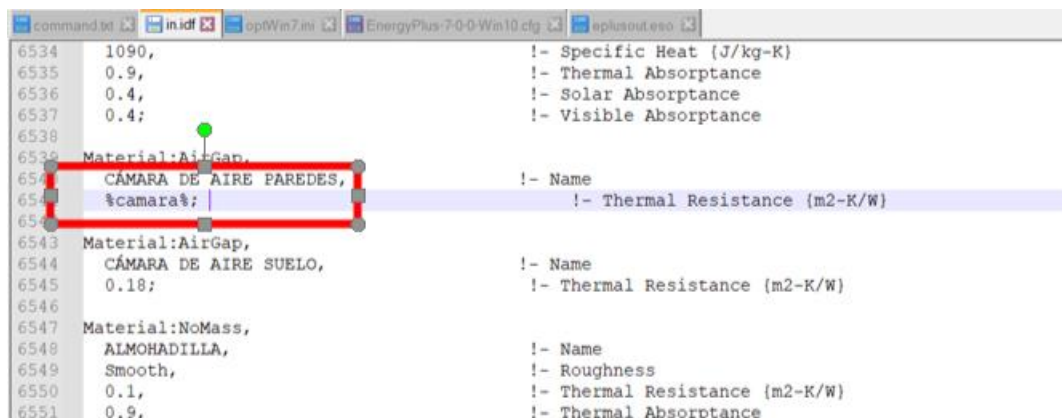


Figura 3-31 Archivo .idf (Autoría Propia)

El initialization file mostrado en la Figura 3-32 es el archivo con el que se va a ejecutar el software GenOpt, en él hay que reseñar el weather file que se ha utilizado durante la simulación y los diferentes archivos necesarios para la optimización.

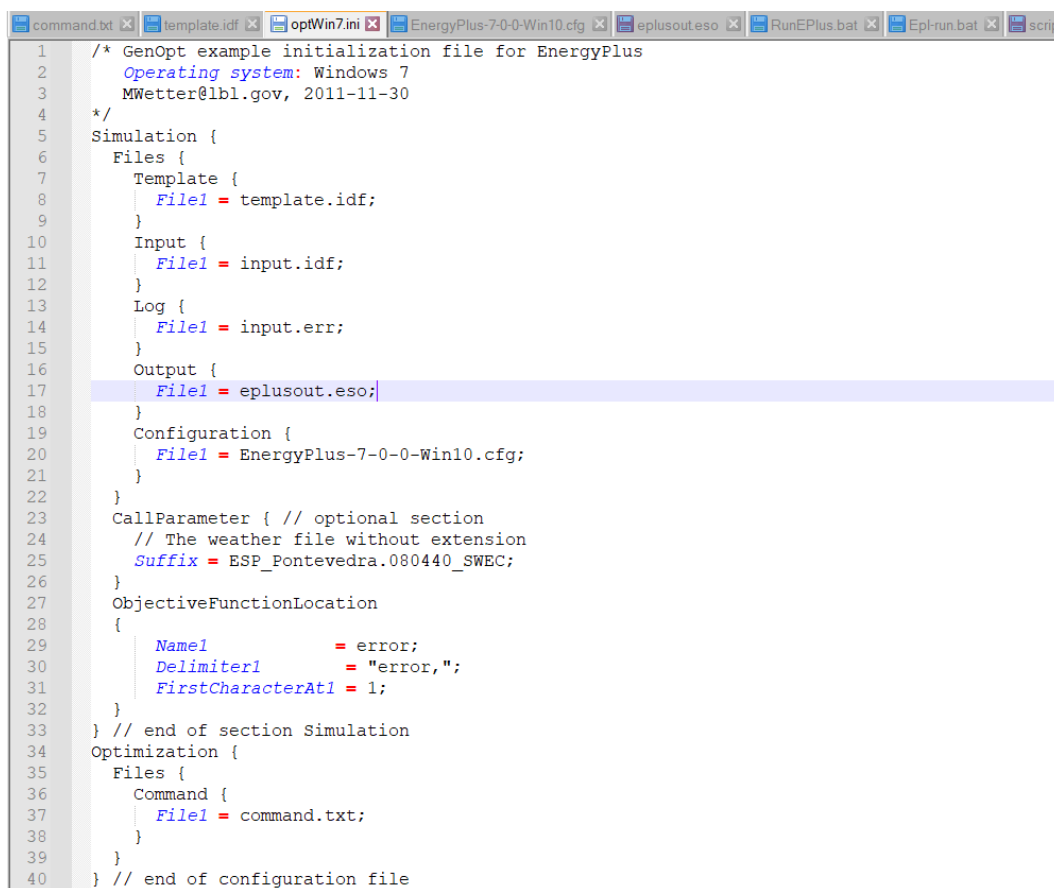


Figura 3-32 Initialization file (Autoría Propia)

El cuarto archivo de Figura 3-33, necesario para poder ejecutar el initiation file en GenOpt, es el configuration file .cfg

```

1  /* GenOpt configuration file for
2  EnergyPlus on Windows XP
3  MWetter@lbl.gov, 11/30/11
4  */
5
6  // Error messages of the simulation program.
7  SimulationError
8  {
9      ErrorMessage = "*** Fatal ***";
10     ErrorMessage = "*** EnergyPlus Terminated--Error(s) Detected";
11 }
12
13 // Number format for writing the simulation input files.
14 IO
15 {
16     NumberFormat = Double;
17 }
18
19 /* Specifying how to start the simulation program.
20 In "Command", only those words in %xx% are
21 replaced (possibly with empty Strings).
22 */
23 SimulationStart
24 {
25     // The command line below calls RunEPlus.bat.
26     Command = "cmd /C \"%C:\Users\pi10gb\Desktop\genopt\genOptProjects\script17.txt.py\" \"%Simulation.Files.Input.File%\\" \"%Simulation.CallParameter.Suffix%\\"";
27     //Command = "cmd /C \"%C:\EnergyPlusV9-4-0\RunEPlus.bat\" \"%Simulation.Files.Input.File%\\" \"%Simulation.CallParameter.Suffix%\\"";
28     WriteInputFileExtension = false;
29 }

```

Figura 3-33 Configuration file (Autoría Propia)

Una vez conseguida la correcta redacción de estos archivos, es necesario la realización de un script que se ha llamado script.py para llevar a cabo la operación que nos permita obtener el CV(RMSE) ya que el programa GenOpt no permite llevar a cabo tal operación matemática.

En este script se ha determinado que el procedimiento para obtener el CV de las dos aulas teniendo en cuenta tanto la temperatura como la humedad relativa es el siguiente:

$$CV1 \text{ (TEMPERATURAS)} = \sum_{i=1}^n \frac{\sqrt{\frac{(T_{sim} - T_{exp})^2}{n}}}{T_{exp}} + \sum_{i=1}^n \frac{\sqrt{\frac{(T_{sim} - T_{exp})^2}{n}}}{T_{exp}}$$

AULA 40 AULA 50

$$CV2 \text{ (HUMEDADES)} = \sum_{i=1}^n \frac{\sqrt{\frac{(HR_{sim} - HR_{exp})^2}{n}}}{HR_{exp}} + \sum_{i=1}^n \frac{\sqrt{\frac{(HR_{sim} - HR_{exp})^2}{n}}}{HR_{exp}}$$

AULA 40 AULA 50

Posteriormente se realiza la suma de ambos errores: CV1 + CV2

De cara al proceso de optimización y calibración, el cálculo del coeficiente de variación del error cuadrático medio se realizará mediante la ejecución de este código. Para explicar este código cabe destacar como he nombrado a cada uno de los datos:

- TSIM40: temperatura simulada del aula 40
- TREAL40: temperatura de los datos experimentales del aula 40
- HSIM40: humedad relativa simulada del aula 40
- HREAL40: humedad relativa de datos experimentales del aula 40
- TSIM52: temperatura simulada del aula 52
- TREAL52: temperatura de datos experimentales del aula 52
- HSIM52: humedad relativa simulada del aula 52
- HREAL52: humedad relativa de datos experimentales del aula 52

Una vez nombrados en el código con el fin de facilitar la comprensión, en la línea siguiente hago una modificación

```
import pandas as pd
import numpy as np
import csv
import subprocess
import sys

subprocess.run(["C:\\EnergyPlusV9-4-0\\RunEPlus.bat", *sys.argv[1:]])
subprocess.run(["C:\\EnergyPlusV9-4-0\\PostProcess\\ReadVarsESO.exe"])

def donato(df, lines):
    df['taucua'] = (((df.tsimcua - df.texpcua)**2)/lines)**0.5/(df.texpcua.mean())
    df['taucin'] = (((df.tsimcin - df.texpcin)**2)/lines)**0.5/(df.texpcin.mean())
    cv1 = df.taucua.sum() + df.taucin.sum()
    df['haucua'] = (((df.hsimcua - df.hexpcua)**2)/lines)**0.5/(df.hexpcua.mean())
    df['haucin'] = (((df.hsimcin - df.hexpcin)**2)/lines)**0.5/(df.hexpcin.mean())
    cv2 = df.haucua.sum() + df.haucin.sum()
    print('The value of CV1 is:')
    print(cv1)
    print('The value of CV2 is:')
    print(cv2)
    numeros = [cv1, cv2]
    nombres = ['CV1', 'CV2']
    return df
    with open('datosRMSE.csv', 'a') as file:
        writer = csv.writer(file)
        writer.writerow(nombres)
        writer.writerow(numeros)

tit = ['TSIM40', 'TREAL40', 'HSIM40', 'HREAL40', 'TSIM52', 'TREAL52', 'HSIM52', 'HREAL52']
sup = ['tsimcua', 'texpcua', 'hsimcua', 'hexpcua', 'tsimcin', 'texpcin', 'hsimcin', 'hexpcin']
data2 = pd.read_csv(r'C:\Users\p10gb\Desktop\TFG\Archivos openstudio\EDIFICIO DE ESTUDIO_FINAL\OPENSTUDIO\run\eplusout.eso')
data = pd.read_csv('DatosTFG.csv', sep=';', decimal=',')

lines = len(data)
print(lines)
print(data)
data = data[tit]
data.columns = sup
df = data
fin = donato(df, lines)
df
```

Resumiendo, como se ha visto anteriormente, ha sido necesario realizar una serie de cambios en los parámetros de la simulación tal y como se ha representado en el `command.txt` que posibilite la aproximación del modelo simulado a el modelo real. De todos los parámetros existentes, siendo estos mostrados en los anexos, hay algunos mas influyentes que otros. Una vez elegido este parámetro se ha intentado ajustar los datos simulados a los reales mediante una serie de iteraciones realizadas.

Una vez definidos los cuatro archivos necesarios para realizar la calibración, se iniciará el proceso de calibración. Con estos archivos y el código, GenOpt comienza un proceso iterativo en el que va variando el parámetro establecido y ejecutando simulaciones sucesivas. Estos datos obtenidos se van comparando con los datos reales, que son a los que se quieren aproximar los datos de simulación y el programa realiza una variación de los parámetros con la finalidad de disminuir el error entre los datos reales y los simulados. Este error ha ido disminuyendo hasta que se ha obtenido 5 veces el mismo valor tal y como viene establecido en la *ASHRAE Guideline 14*.

4 RESULTADOS

4.1 Resultados de los datos experimentales

En este apartado se irá aportando de forma cronológica los datos que se han ido obteniendo a lo largo del presente TFG. En el primer apartado se Se empezará mostrando las temperatura y humedades relativas obtenidas durante los dos meses que se ha estado monitorizando las aulas docentes. Tras esto, se expondrá los datos obtenidos de la simulación realizada con el software OpenStudio, que se comparará con los datos experiemntales obtenidos previamente. Como se ha afirmado anteriormente, este ajuste no suele ser satisfactorio, siendo una de las principales razones las numerables fuentes de error que intervienen en la simulación térmica tal y como podemos observas en este trabajo. Una vez obtenidos y mostrados el error obtenido entre los datos experimentales y simulados, se mostrarán los datos una vez se haya realizado la calibración, haciendo una comparación gráfica tal y como se ha realizado en los pasos anteriores.

4.1.1 Datos obtenidos de humedad relativa y temperatura exterior

En cuanto a los datos obtenidos durante dos meses, exactamente desde el 1 de febrero hasta el 31 de marzo. Primero hay que tener en cuenta los antecedentes de las temperaturas y las precipitaciones del año 2022 como se puede observar en la figura 4-1.[42]

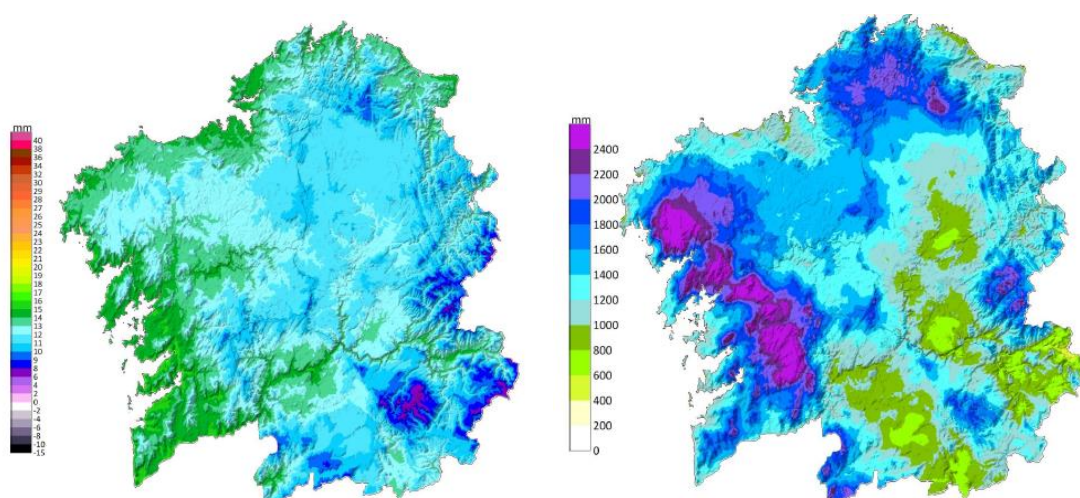


Figura 4-1. Temperatura y precipitaciones Galicia 2022, (Meteogalicia)

4.1.2 Datos de temperatura y humedad del aula 40

Una vez obtenidos los datos reales de temperatura y humedad relativa del aula 40, a través del sistema de monitorización, se ha realizado una media de los valores obtenidos como se ha especificado en el apartado de desarrollo. Como se puede comprobar en la figura se ve un incremento de la temperatura sobre las 0815 que coincide con la entrada de los Guardiamarinas de 2º en el comienzo de sus actividades docentes. También se puede ver representado una leve caída de la temperatura entorno a las 1020, momento en que los alumnos por lo general abandonan las aulas durante 20 minutos. Se aprecia de la misma forma un descenso de esta hacia las 1400, hora en que todos los alumnos del batallón de la Escuela Naval Militar finalizan las clases de la mañana. También se ve representado un incremento sobre las 1600-1615 período en que los futuros oficiales de la Armada Española afrontan su último período de clases hasta las 1830, momento en el que se ve claramente el pico de temperatura.

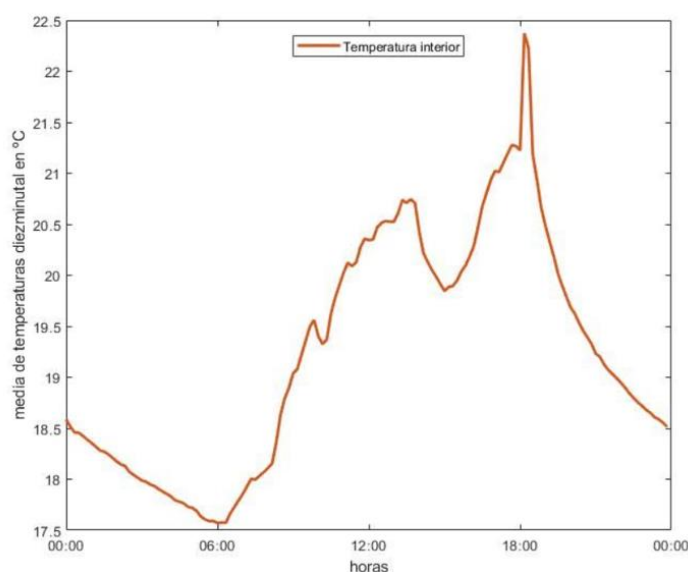


Figura 4-2 Temperatura Aula 40

Como bien se sabe, la humedad relativa, al igual que la temperatura, es uno de los factores más claves a tener en cuenta para evaluar el bienestar cuando se ocupa cualquier espacio, tal y como se ha hablado anteriormente en el confort térmico. Cuando se habla de humedad relativa, se hace como una medida porcentual que determina la relación entre la humedad que contiene una masa de aire respecto a la que podría tener. Por lo general los porcentajes ideales de humedad se sitúan entre el 30% y el 65%, refiriéndonos directamente a humedad relativa ya que la RAE define la humedad como agua que se mezcla con el aire o agua que está impregnado en un cuerpo. Como se puede comprobar en la figura 4-3 se encuentra dentro de los porcentajes ideales de humedad relativa. En condiciones de baja humedad relativa, nuestros mecanismos de regulación del cuerpo evaporarían de forma excesiva el sudor del cuerpo teniendo como resultado sequedad en la piel. En el caso de que se tuviese una humedad relativa alta nos impediría evaporar el sudor, incrementando la sensación de calor.

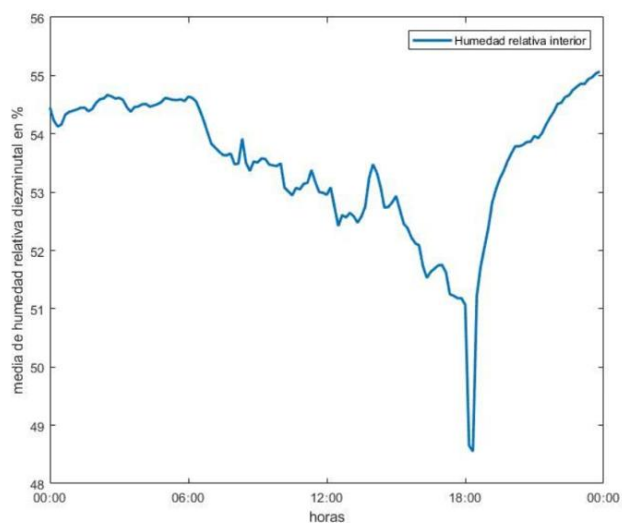


Figura 4-3 Humedad relativa aula 40

4.1.3 Datos de temperatura y humedad relativa del aula 52

A su vez, en esta aula usada predominantemente por los alumnos de 1º curso, se puede observar un aumento de la temperatura más temprano debido a que todos los alumnos de la escuela tienen un estudio obligatorio a primera hora de la mañana. A diferencia del resto de la escuela estos alumnos realizan ese estudio en dicha aula. También es importante reseñar que a diferencia de la gráfica del aula 40 se puede apreciar que a partir de las 1800 la temperatura no baja tan constantemente. Esto se debe a que los alumnos de primer curso realizan estudio nocturno también en esta aula.

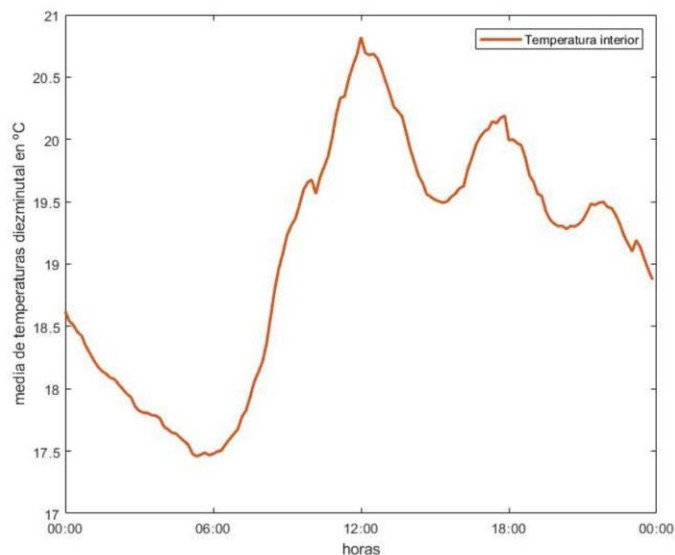


Figura 4-4 Temperatura Aula 52

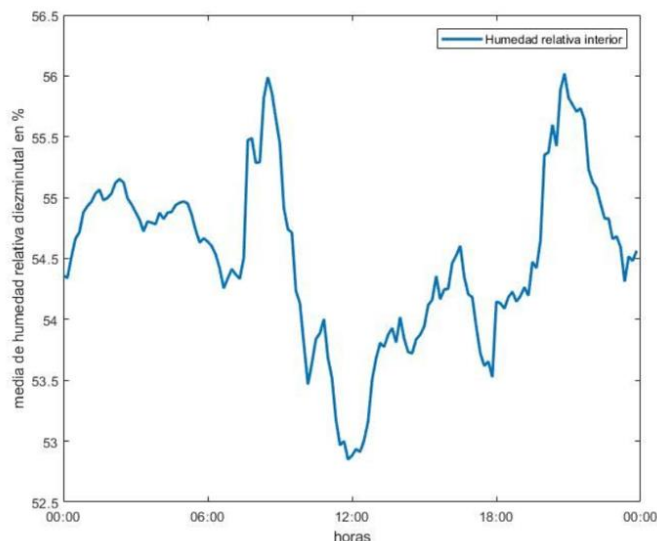


Figura 4-5 Humedad relativa Aula 52

4.2 Resultados de la simulación térmica

Estos son los datos que se han sacado de la simulación en OpenStudio tras todo lo hecho en el desarrollo de este trabajo. Se han cogido estos datos como ejemplo, de la aplicación XesoView en el que nos ha proporcionado todos los datos de las zonas térmicas establecidas en el apartado de *Variables* en el software OpenStudio. Como se puede comprobar con todas estas gráficas, se aprecia que son muy diferentes respecto a los datos obtenidos en el proceso experimental. Esto se puede atribuir a las cuantiosas fuentes de error que forman parte de cualquier proceso de simulación térmica. Este error se mostrará en el siguiente apartado mostrando gráficas del mismo formato comparando uno a uno, los datos experimentales y los datos simulados obtenidos. Dicho error tratará de reducirse en el proceso de calibración tal y como viene establecido en el resumen al inicio del trabajo.

4.2.1 Simulación del aula 40

Como podemos observar en Figura 4-6, se parecía una gran diferencia con los datos experimentales obtenidos en el proceso experimental tal y como se ha expresado en el apartado anterior. Esta diferencia se debe a que cualquier proceso de simulación térmica tiene una gran serie de errores que se van a tratar de corregir en el proceso de calibración. Se aprecia al igual que en las gráficas experimentales un gran incremento de temperatura a la hora que se inicia la jornada docente, con su respectivo decremento a las 1400 tras el período en que los alumnos tienen turno de comedor y a las 1835 cuando finalizan las clases como viene establecido en el horario docente. En la Figura 4-7 se muestra la humedad relativa teniendo su mínimo valor hacia las 1530, en contraste a los

datos experimentales que lo tiene a las 1200. En la Figura 4-8, se muestra un ejemplo de la temperatura y humedad relativa del día 1 de febrero.

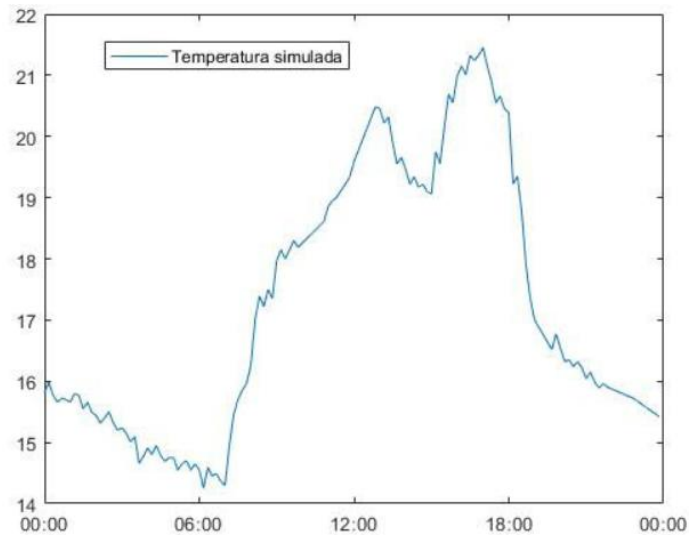


Figura 4-6 Temperatura simulada Aula 40

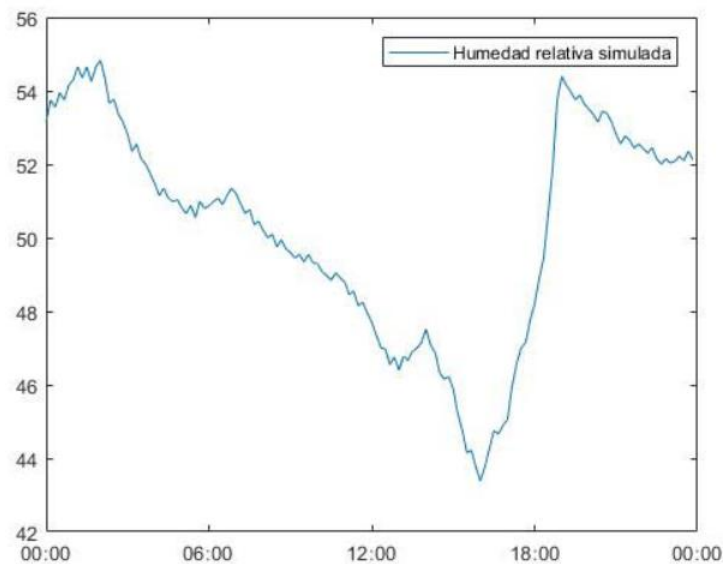


Figura 4-7 Humedad relativa simulada Aula 40

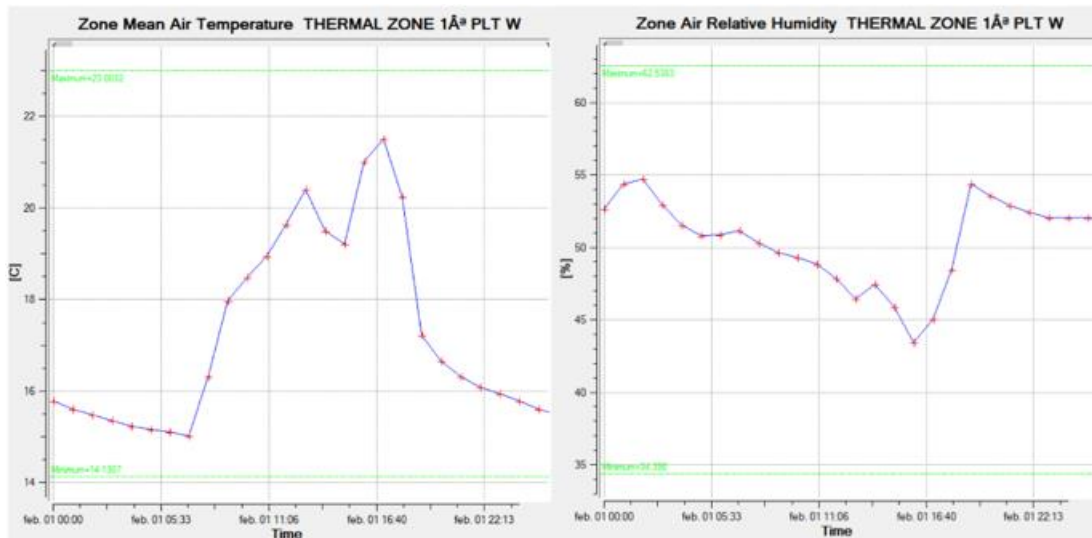


Figura 4-8 Variables Aula 40 XesoView

4.2.2 Simulación del aula 52

En la obtención de los datos del aula 52, se puede apreciar al igual que en los datos del aula 40 un gran diferencia inicial entre los datos experimentales con los simulados. En la Figura 4-9 al se observa el incremento inicial de temperatura cerca de las 0700 cuando los aspirantes tienen el estudio tutorizado de por la mañana. Se destaca al igual que en el aula 40, el descenso de las temperaturas en el período en el que los alumnos de primer curso tienen el turno de comida e instrucción militar. Tiene su pico de temperatura cerca de las 1730 y vuelve a disminuir a las 1815 cuando acaban la jornada docente. A diferencia de la temperatura del aula 40, en esta gráfica se puede apreciar como las temepaturas vuelven a aumentar debido a que los aspirantes realizan ahí el estudio tutorizado de por la noche. Al igual que en el apartado anterior la Figura 4-10, presenta una gran diferencia con los datos experimentales.

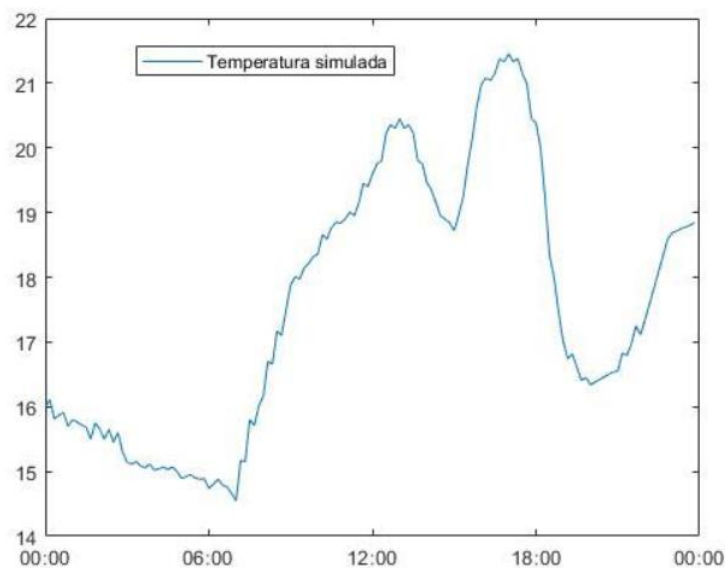


Figura 4-9 Temperatura simulada Aula 52

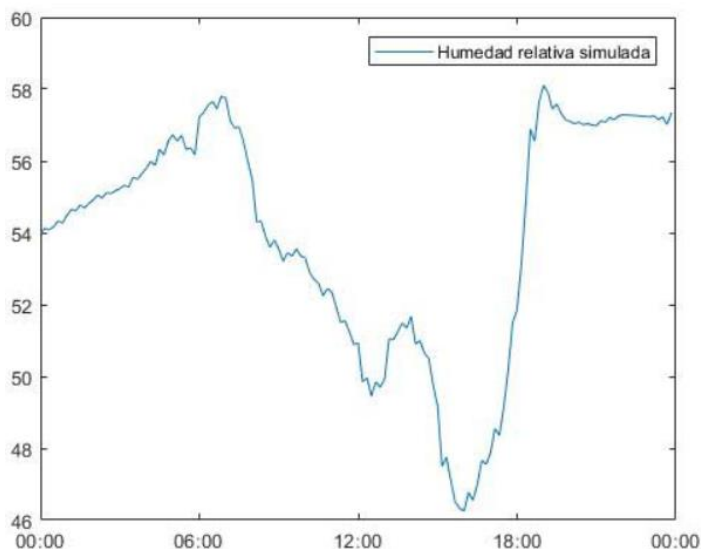


Figura 4-10 Humedad relativa simulada Aula 52

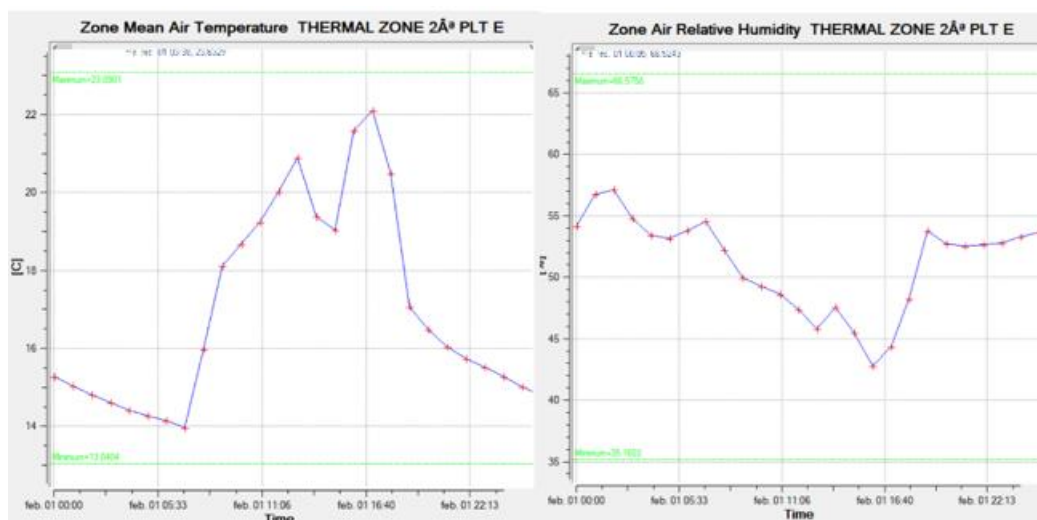


Figura 4-11 Variables Aula 50 XesoView

4.3 Comparación de los datos experimentales y simulados

Una vez sacados los datos experimentales y simulados durante el mes de febrero y habiendo hecho la media por horas, se va a hacer una comparación inicial de cada uno de ellos, haciendo 4 gráficas mostrando en cada una la temperatura o humedad relativa de la determinada aula con la finalidad de mostrar el error obtenido entre los datos reales y la simulación. Una vez realizado esto se mostrará otra comparación de los datos en el mismo formato con la calibración hecha y su correspondiente reducción del error entre ambos datos.

4.3.1 Relación de temperaturas en el aula 40

En la Figura 4-12 se observa que las dos incrementan prácticamente a la misma hora coincidiendo con el inicio de la jornada docente. Las dos coinciden en el descenso de las temperaturas hacia las 1400, aumentan con el inicio de las clases a las 1610 y vuelven a caer tras la finalización de la jornada educativa hacia las 1835. Se aprecia un gran error al inicio y final de las gráficas.

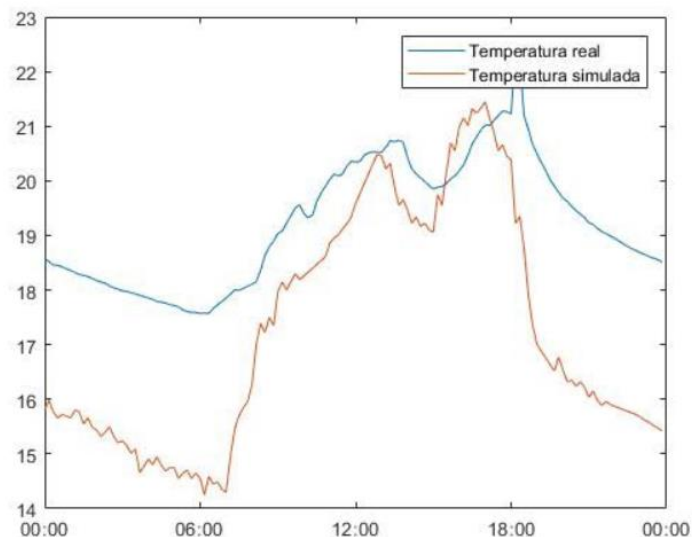


Figura 4-12 Comparación temperaturas aula 40

4.3.2 Relación de temperaturas en el aula 52

En la Figura 4-13, también se puede observar la conyuntura de las dos gráficas en el descenso de las temperaturas en el período de comida a las 1400 y su correspondiente incremento de estas a las 1615 con el reinicio de la jornada docente. Coinciden también al igual que en el aula 40, el descenso a las 1835, pero no coinciden posteriormente en el leve incremento de las temperaturas ya que como se ha indicado anteriormente en este aula, los alumnos realizan un estudio de refuerzo tutorizado después de la cena.

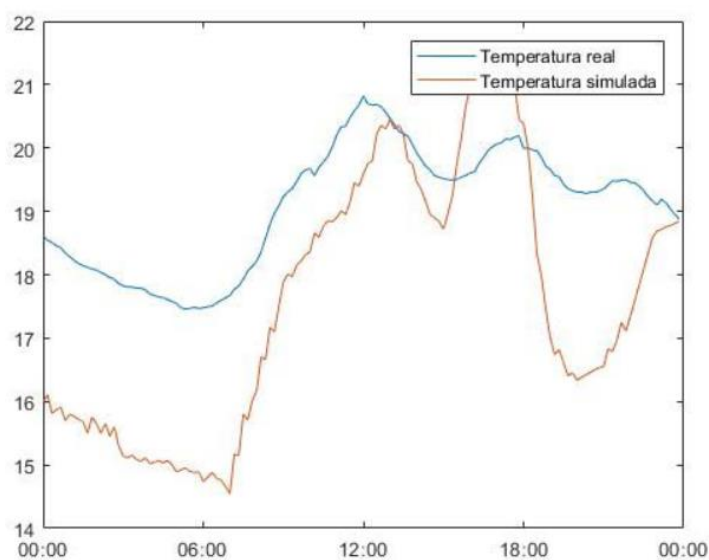


Figura 4-13 Comparación temperaturas aula 52

4.3.3 Relación de humedades relativas en el aula 40

A diferencia de las temperaturas, la relación de las humedades relativas simuladas y las obtenidas en los datos experimentales tal y como podemos observar en la Figura 4-14, hay un gran error que se debe en su gran parte a la gran cantidad de fuente de error que como se ha visto a lo largo de este trabajo, intervienen en cualquier proceso de simulación térmica. Este error se va a tratar de corregir durante el proceso de calibración que se lleva a cabo en el próximo apartado.

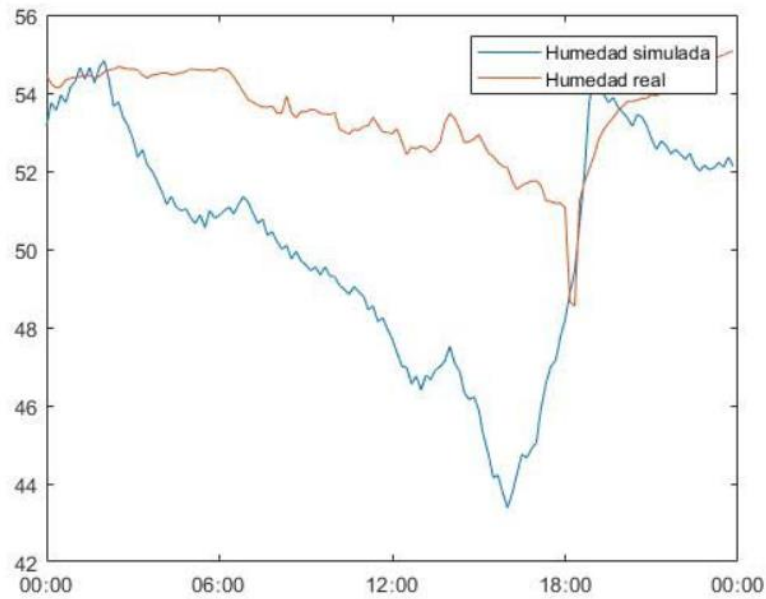


Figura 4-14 Comparación humedad relativa aula 40

4.3.4 Relación de humedades relativas en el aula 52

Al igual que en el aula 40, debido a la gran cantidad de fuentes de errores que puede tener cualquier simulación térmica, en esta gráfica también se observa una gran diferencia de las humedades obtenidas de la simulación y las obtenidas del proceso experimental. Error que se va a tratar de reducir en el próximo apartado.

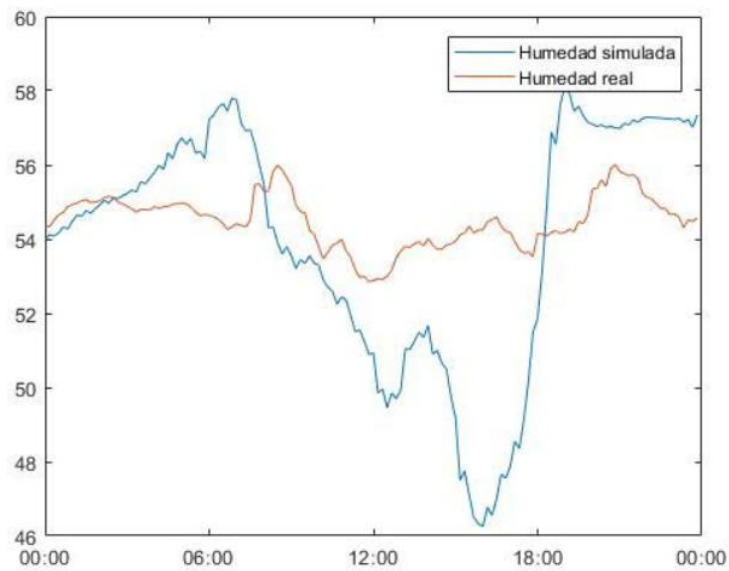


Figura 4-15 Comparación humedad relativa aula 52

4.4 Resultados de la calibración

Para obtener estos resultados ha sido fundamental realizar el análisis para descubrir los parámetros del modelo cuya variación no tiene gran peso tras la realización de la simulación, y así mismo cuales no lo son con la finalidad de no ser incluidos en el proceso de de calibración. Los datos obtenidos muestran que este método de calibración es válido para ser aplicados en el campo de la edificación, ya que como se observa en la figura, se han podido llevar a cabo una gran reducción en las medidas del error CV(RMSE) considerando valores adecuados para tal proceso. Tal y como se muestra en la Tabla 4-1, en esta calibración se ha podido reducir el CV(RMSE) en un 45%, de un CV inicial de 59% hasta el 14%. La Tabla 4-2

Error	Simulación inicial (%)	Simulación calibrada (%)	Reducción (%)
CV(RMSE)	59,67	24,04	59,28

Tabla 4-1 Resultados calibración

Variable	Valor diseño	Valor calibrado
Cámara de aire Paredes	59,67	24,04

Tabla 4-2 Espesor tras calibración

4.4.1 Calibración de la temperatura aula 40

En la Figura 4-16 se puede observar como se ha reducido el error obtenido inicialmente entre los datos experimentales y los datos simulados tras los procesos desarrollados en el presente trabajo. Se ha ido realizando las iteraciones hasta obtener el mismo resultado cinco veces tal y como vienen establecido los requisitos del *ASHRAE Guideline*. [41]

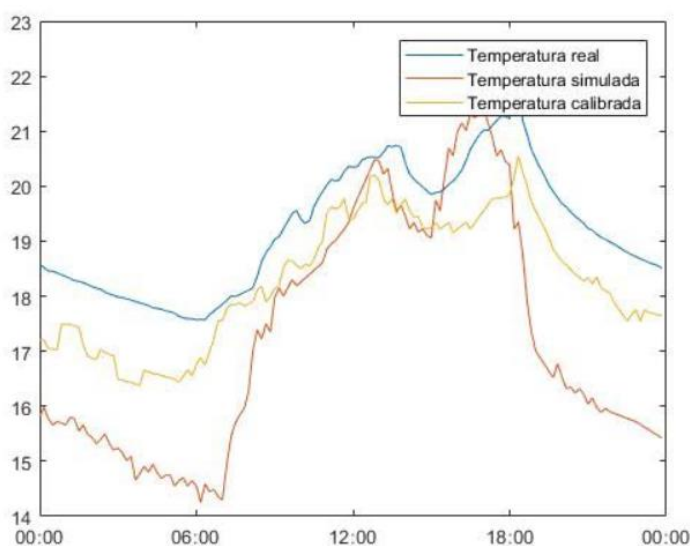


Figura 4-16 Calibración temperatura aula 40

4.4.2 Calibración de la temperatura aula 52

En la Figura 4-17 al igual que en la anterior, se observa el error medianamente corregido tal y como se ha desarrollado en el trabajo. Hay que tener en cuenta que al ser un único parámetro el que se ha ido modificando a lo largo de las iteraciones realizadas no puede optimizarse de una forma mucho más satisfactoria.

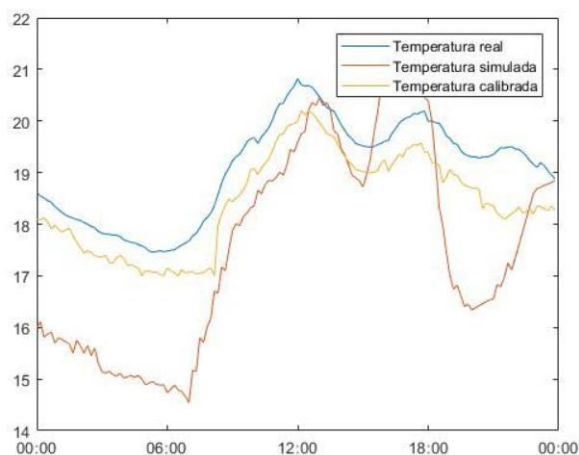


Figura 4-17 Calibración temperatura aula 52

4.4.3 Calibración de la humedad relativa aula 40

Tal y como se muestra en la gráfica de calibración de la humedad relativa del aula 40, el error obtenido inicialmente con las dos aulas del valor de humedad relativa era considerablemente más grande que el error de las temperaturas.

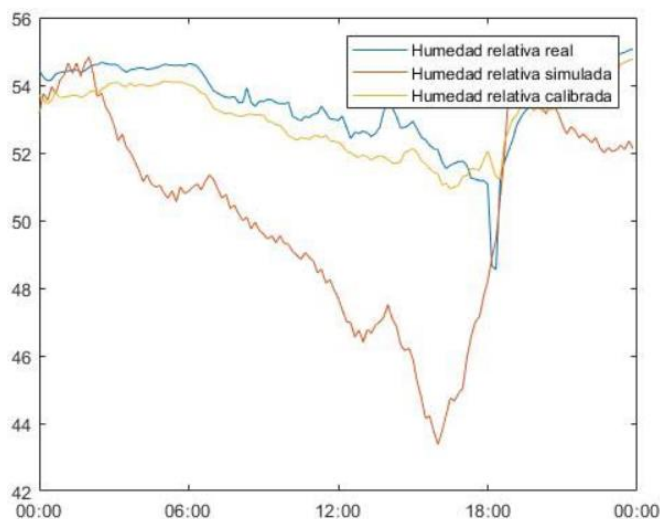


Figura 4-18 Calibración humedad relativa aula 40

4.4.4 Calibración de la humedad relativa aula 52

Por último, pero no por ello menos importante, podemos observar en la Figura 4-19 la calibración realizada del error inicial obtenido de la humedad relativa procedente de los datos experimentales y la simulada. Al igual que la gráfica del aula 40, se puede divisar la gran corrección tras el considerable error obtenido inicialmente en el estudio de ambas humedades relativas.

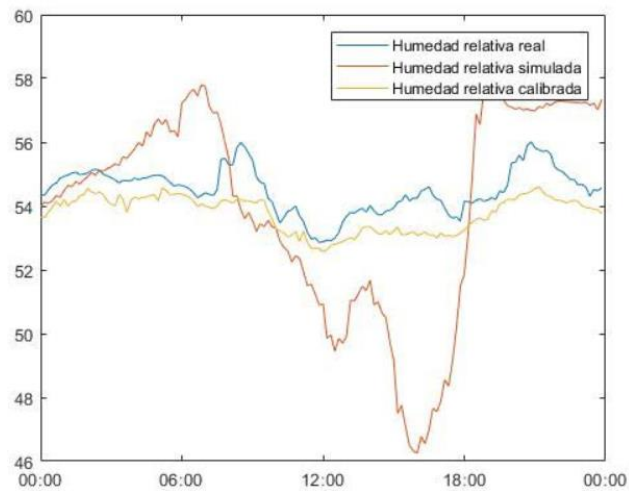


Figura 4-19 Calibración humedad relativa aula 52

5 CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

5.1 Conclusiones

Esta actualidad que está marcada en gran parte por el cambio climático, escasez de energías fósiles y por la aceleración en el proceso de calentamiento global, la mayoría de las instituciones tratan de reducir su huella ecológica. Es por eso por lo que la Armada Española no quiere quedarse estancada y seguir actualizándose en este aspecto.

Es evidente, como se ha podido comprobar a lo largo del trabajo el gran margen de mejora que tiene el edificio Isaac Peral en términos de eficiencia energética. Se ha demostrado a través de las diferentes simulaciones llevadas a cabo en este proceso que es posible la implementación de medidas que conlleven a una mejora energética al mismo tiempo que sirva para la Armada Española a conseguir un ahorro económico tan necesario en estos tiempos.

Como primera conclusión es necesario destacar que se han cumplido varios de los objetivos tal y como se ha propuesto en el apartado 1.2 del presente trabajo.

El modelo térmico calibrado de cualquier instalación es una herramienta bastante útil para poder llevar a cabo un análisis adecuado del mismo. Posibilita tanto analizar si evoluciona en concordancia a lo establecido en la fase de diseño, como realizar predicciones de su comportamiento en el futuro. Para la realización de la calibración es fundamental una monitorización detallada de las condiciones de las instalaciones tal y como se ha desarrollado en el presente TFG. Este registro de datos debe ser comparados con lo valores obtenidos de la simulación para poder comprobar la precisión alcanzada.

También, se ha demostrado que los métodos de calibración llevados a cabo en este proceso son especialmente válidos para el campo de la edificación, ya que nos ha proporcionado en este caso, una gran reducción de las medidas del coeficiente de variación del error cuadrático medio tal y como se ha expuesto en el apartado de resultados, obteniendo una serie de valores adecuados de la manera que recoge el *ASHRAE Guideline*.

5.2 Líneas futuras

Se ha demostrado en este trabajo que los beneficios que se pueden obtener con este tipo de medidas y optimizaciones que se ha logrado en el caso específico del edificio Isaac Peral también se pueden llevar a cabo tanto de la Armada Española como en otros Centros Universitarios de la Defensa de cualquier academia como en cualquier unidad de las Fuerzas Armadas. Sería de ayuda y bastante necesario realizar un sondeo del número de recursos económicos y energéticos sería capaz de ahorrar el Ministerio de Defensa tras llevar a cabo este tipo de medidas en cualquiera de sus instalaciones. Por lo que a parte de alcanzar los objetivos de desarrollo sostenible que ha definido la Armada en su política medioambiental

a través del documento *Linea Generales de la Armada*, se podría mejorar aún más la imagen corporativa de la institución publicando dichos resultados y dando a conocer el compromiso que la Armada Española tiene desde hace ya unos cuantos años.

Se ha hecho evidente la gran utilidad que tienen los distintos softwares utilizados en este trabajo, considerándolo herramienta clave en cualquier proceso de mejora energética, basándonos también en otro de los compromisos que tiene esta institución intentando optimizar el proceso en el cual la Escuela Naval Militar también lleva bastante tiempo centrado hasta alcanzar la deseada Armada 4.0. Estas herramientas nos hacen posible el análisis previo de los beneficios energéticos que cada tipo de medida de conservación ofrece, y se puede llevar a cabo tanto en edificios ya construidos, cuyo rendimiento energético se quiera incrementar, como edificios en fase de diseño. Este proceso tiene la gran ventaja que se puede realizar en cualquier lugar, siempre y cuando se disponga del archivo meteorológico necesario para ello.

La metodología de calibración y optimización utilizada es susceptible de ser renovada con la finalidad de seguir reduciendo las discrepancias entre los diferentes modelos a utilizar a la vez que se permita obtener una mayor fiabilidad del proceso. A pesar de que el método utilizado ha proporcionado resultados beneficiosos, sería bastante interesante llevar a cabo una investigación con la integración de otros algoritmos de optimización en lugar de Hooke-Jeeves. También, con el fin de poder generalizar estos resultados, sería necesario utilizar estas técnicas en otro tipo de instalaciones o construcciones, con diferentes usos, como centros polideportivos, naves industriales, donde los tipos de cargas son distintos.

6 BIBLIOGRAFÍA

- [1] «Cambio Climático| Naciones Unidas». <https://www.un.org/es/climatechange/what-is-climate-change> (accedido 19 de marzo de 2022).
- [2] «Organización Meteorológica Mundial». <https://public.wmo.int/es>
- [3] «IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change». https://archive.ipcc.ch/home_languages_main_spanish.shtml (accedido 24 de marzo de 2022).
- [4] V. Creative, «The IPCC climate impacts report is here.», *Climate Outreach*, 24 de febrero de 2022. <https://climateoutreach.org/communicating-ipcc-impacts/> (accedido 19 de marzo de 2022).
- [5] «La Convención Marco de Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC)». <https://www.miteco.gob.es/es/cambio-climatico/temas/el-proceso-internacional-de-lucha-contra-el-cambio-climatico/naciones-unidas/CMNUCC.aspx> (accedido 19 de marzo de 2022).
- [6] «Protocolo de Kyoto | CMNUCC». https://unfccc.int/es/kyoto_protocol.
- [7] «Red Eléctrica de España». <https://www.ree.es/es/clientes/generador/acceso-conexion/conoce-la-capacidad-de-acceso>.
- [8] «Real Decreto 1027/2007». <https://www.boe.es/eli/es/rd/2007/07/20/1027>.
- [9] «BOE.es - BOE-A-1978-31229 Constitución Española.» <https://www.boe.es/buscar/act.php?id=BOE-A-1978-31229>.
- [10] «marpol_articulos.pdf». Accedido: 19 de marzo de 2022. [En línea]. Disponible en: https://www.mitma.gob.es/recursos_mfom/marpol_articulos.pdf
- [11] EALDE, «Sistema de Gestión Ambiental», *EALDE Business School*, 25 de noviembre de 2020. <https://www.ealde.es/sistema-de-gestion-ambiental/>.
- [12] «ISO 14001: ¿En qué se basa un Sistema de Gestión Ambiental?» <https://www.nueva-iso-14001.com/2014/11/iso-14001-en-que-se-basa-un-sistema-de-gestion-ambiental>.
- [13] «espana-eficiencia-energetica.pdf». Accedido: 19 de marzo de 2022. [En línea]. Disponible en: <https://www.odyssee-mure.eu/publications/national-reports/espana-eficiencia-energetica.pdf>
- [14] «Consumo energético mundial | Consumo eléctrico | Enerdata». <https://datos.enerdata.net/electricidad/datos-consumo-electricidad-hogar.html>.
- [15] «Ahorro y eficiencia energética | Idae». <https://www.idae.es/ahorro-y-eficiencia-energetica>.
- [16] «Miteco.Mitigación políticas cambio climático.» <https://www.miteco.gob.es/es/cambio-climatico/temas/mitigacion-politicas-y-medidas/edificacion.aspx>.
- [17] «1603346_8.pdf». [En línea]. Disponible en: https://www.cnmc.es/sites/default/files/1603346_8.pdf

- [18] «BOE.es - BOE-A-2013-3904 Real Decreto 235/2013, de 5 de abril, por el que se aprueba el procedimiento básico para la certificación de la eficiencia energética de los edificios.» <https://www.boe.es/buscar/act.php?id=BOE-A-2013-3904>.
- [19] «BOE.es - BOE-A-2021-9176 Real Decreto 390/2021, de 1 de junio, por el que se aprueba el procedimiento básico para la certificación de la eficiencia energética de los edificios.» <https://www.boe.es/buscar/act.php?id=BOE-A-2021-9176>.
- [20] «Envolvente térmica de los edificios.» <https://www.certificadosenergeticos.com/sabemos-definir-envolvente-termica-edificios-eficiencia-energetica>
- [21] «Definir la envolvente térmica de los edificios.» <https://www.certificadosenergeticos.com/sabemos-definir-envolvente-termica-edificios-eficiencia-energetica>.
- [22] «Ahorro de energía». <https://www.codigotecnico.org/DocumentosCTE/AhorroEnergia.html>.
- [23] «España: Zonas Climáticas por Provincia - Construmatica». https://www.construmatica.com/construpedia/Espa%C3%B1a:_Zonas_Clim%C3%A1ticas_por_Provincia
- [24] «Confort Térmico. - Construmatica». https://www.construmatica.com/construpedia/Confort_T%C3%A9rmico.
- [25] «Cartas Bioclimáticas - Construmatica». https://www.construmatica.com/construpedia/Cartas_Bioclim%C3%A1ticas.
- [26] «CTE.Historia». <https://www.codigotecnico.org/QueEsCTE/Historia.html>.
- [27] «Reglamento de Instalaciones Térmicas de los Edificios. RITE | Idae». <https://www.idae.es/tecnologias/eficiencia-energetica/edificacion/reglamento-de-instalaciones-termicas-de-los-edificios> (accedido 19 de marzo de 2022).
- [28] Ministerio de la Presidencia, *Real Decreto 47/2007, de 19 de enero, por el que se aprueba el Procedimiento básico para la certificación de eficiencia energética de edificios de nueva construcción*, vol. BOE-A-2007-2007. 2007, pp. 4499-4507. Accedido: 19 de marzo de 2022. [En línea]. Disponible en: <https://www.boe.es/eli/es/rd/2007/01/19/47>
- [29] «SketchUp». <https://www.sketchup.com/es>.
- [30] «Software de diseño 3D | Modelado 3D en la web | SketchUp». <https://www.sketchup.com/es>
- [31] «OpenStudio». <https://openstudio.net/>
- [32] «EnergyPlus». <https://energyplus.net/>
- [33] «GenOpt». <https://simulationresearch.lbl.gov/GO/> (accedido 25 de marzo de 2022).
- [34] A. Española, «Historia de la Armada - Especiales - Armada Española - Ministerio de Defensa - Gobierno de España». <https://armada.defensa.gob.es/ArmadaPortal/page/Portal/ArmadaEspañola/conocenos/especiales/prefLang-es/02dia-de-las-fuerzas-armadas--02dia-de-las-fuerzas-armadas-2017--01historia-armada>.
- [35] «Información sobre Centros Docentes Militares de Formación (Escuela Naval Militar, Marín-Pontevedra) – SERMILITAR © – Oposiciones militares.» <https://www.sermilitar.com/informacion-sobre-centros-docentes-militares-de-formacion-escuela-naval-militar-marin-pontevedra/>.
- [36] A. Industries, «Adafruit Sensirion SHT31-D». <https://www.adafruit.com/product/2857>.
- [37] «Samsung», *Samsung es*. <https://www.samsung.com/es/memory-storage/memory-card/>.
- [38] «Histórico da rede meteorológica - Meteogalicia». <https://www.meteogalicia.gal/observacion/estacionshistorico/consultar.action>.
- [39] «Rede meteorológica - Meteogalicia». https://www.meteogalicia.gal/observacion/estacions/estacions.action?request_locale=gl#.
- [40] «Table 2. Root mean square error (RMSE) and coefficients of variation...», *ResearchGate*. https://www.researchgate.net/figure/Root-mean-square-error-RMSE-and-coefficients-of-variation-CV-RMSE-mean-GPP-of_tbl2_228828733 (accedido 24 de marzo de 2022).
- [41] «ASHRAE Guideline». <https://www.ashrae.org/technical-resources/standards-and-guidelines>.

- [42] «202202_gl.pdf».. Disponible en:
https://www.meteogalicia.gal/datosred/infoweb/clima/informes/estacions/mensuais/2022/202202_gl.pdf

ANEXO I: PLANOS EDIFICIOS ISAAC PERAL



Figura 0-1 Planta baja Isaac Peral formato DWG. (CAD)



Figura 0-2 Primera planta Isaac Peral formato DWG. (CAD)

ANEXO II: MATERIALES AULAS ISAAC PERAL

Materials

HORMIGÓN DE SUELO

HORMIGÓN LIGERO

HORMIGÓN PESADO

BCL LADRILLO

MEMBRANA DEL TECHO

RECUBRIMIENTO DE STUCCO

YESO PAREDES EXTERIORES

YESO PAREDES INTERIORES

No Mass Materials

Air Gap Materials

Simple Glazing System Window Materials

Glazing Window Materials

Name:

HORMIGÓN DE SUELO

Measure Tags (Optional):

Standard:Standard Source:Standards Category:Standards Identifier:Composite Framing Material:Composite Framing Configuration:Composite Framing Depth:Composite Framing Size:Composite Cavity Insulation:

Roughness:

Rough

Thickness:

0.101600

 m

Conductivity:

1.311000

 W/m·KDensity:

2240.000000

 kg/m³

Specific Heat:

836.800000

 J/kg·KThermal Absorptance:

0.900000

Solar Absorptance:

0.850000

Visible Absorptance:

0.850000

Figura 0-1 Propiedades hormigón de suelo

The screenshot shows a software interface with a 'Materials' tab selected. On the left is a list of materials, with 'HORMIGÓN LIGERO' highlighted. The main area displays the properties for this material.

Materials List (Left Panel):

- HORMIGÓN DE SUELO
- HORMIGÓN LIGERO**
- HORMIGÓN PESADO
- LADRILLO
- MEMBRANA DEL TECHO
- RECUBRIMIENTO DE STUCCO
- YESO PAREDES EXTERIORES
- YESO PAREDES INTERIORES
- No Mass Materials
- Air Gap Materials
- Simple Glazing System Window Materials
- Glazing Window Materials

Material Properties (Main Panel):

Name: HORMIGÓN LIGERO

Measure Tags (Optional):

- Standard:** [Dropdown]
- Standard Source:** [Dropdown]
- Standards Category:** [Dropdown]
- Standards Identifier:** [Dropdown]
- Composite Framing Material:** [Dropdown]
- Composite Framing Configuration:** [Dropdown]
- Composite Framing Depth:** [Dropdown]
- Composite Framing Size:** [Dropdown]
- Composite Cavity Insulation:** [Dropdown]

Physical Properties:

- Roughness:** MediumRough [Dropdown]
- Thickness:** 0.101600 m
- Conductivity:** 0.530000 W/m·K
- Density:** 1280.000000 kg/m³
- Specific Heat:** 840.000000 J/kg·K
- Thermal Absorptance:** 0.900000
- Solar Absorptance:** 0.500000
- Visible Absorptance:** 0.500000

Figura 0-2 Propiedades hormigón ligero

Materials

HORMIGÓN DE SUELO

HORMIGÓN LIGERO

HORMIGÓN PESADO

LADRILLO

MEMBRANA DEL TECHO

RECUBRIMIENTO DE STUCCO

YESO PAREDES EXTERIORES

YESO PAREDES INTERIORES

No Mass Materials

Air Gap Materials

Simple Glazing System Window Materials

Glazing Window Materials

Name:

HORMIGÓN PESADO

Measure Tags (Optional):

Standard:

Standard Source:

Standards Category:

Standards Identifier:

Composite Framing Material:

Composite Framing Configuration:

Composite Framing Depth:

Composite Framing Size:

Composite Cavity Insulation:

Roughness:

Thickness:

Conductivity:

Density:

Specific Heat:

Thermal Absorptance:

Solar Absorptance:

Visible Absorptance:

MediumRough

0.203300 m

1.729600 W/m·K

2243.000000 kg/m³

837.000000 J/kg·K

0.900000

0.650000

0.650000

Figura 0-3 Propiedades hormigón pesado

Materials

HORMIGÓN DE SUELO

HORMIGÓN LIGERO

HORMIGÓN PESADO

LADRILLO

MEMBRANA DEL TECHO

RECUBRIMIENTO DE STUCCO

YESO PAREDES EXTERIORES

YESO PAREDES INTERIORES

No Mass Materials

Air Gap Materials

Simple Glazing System Window Materials

Glazing Window Materials

Name:

LADRILLO

Measure Tags (Optional):

Standard:

Standard Source:

Standards Category:

Standards Identifier:

Composite Framing Material:

Composite Framing Configuration:

Composite Framing Depth:

Composite Framing Size:

Composite Cavity Insulation:

Roughness:

MediumRough

Thickness:

0.101600 m

Conductivity:

0.780000 W/m·K

Density:

1762.030971 kg/m³

Specific Heat:

790.000000 J/kg·K

Thermal Absorptance:

0.900000

Solar Absorptance:

0.700000

Visible Absorptance:

0.700000

Figura 0-4 Propiedades ladrillo

Materials

HORMIGÓN DE SUELO

HORMIGÓN LIGERO

HORMIGÓN PESADO

LADRILLO

BCL

MEMBRANA DEL TECHO

RECUBRIMIENTO DE STUCCO

YESO PAREDES EXTERIORES

YESO PAREDES INTERIORES

No Mass Materials

Air Gap Materials

Simple Glazing System Window Materials

Glazing Window Materials

Name:

MEMBRANA DEL TECHO

Measure Tags (Optional):

Standard:

Standard Source:

Standards Category:

Standards Identifier:

Composite Framing Material:

Composite Framing Configuration:

Composite Framing Depth:

Composite Framing Size:

Composite Cavity Insulation:

Roughness:

VeryRough

Thickness:

0.009500

m

Conductivity:

0.160000

W/m·K

Density:

1121.290000

kg/m³

Specific Heat:

1460.000000

J/kg·K

Thermal Absorptance:

0.900000

Solar Absorptance:

0.700000

Visible Absorptance:

0.700000

Figura 0-5 Propiedades membrana del techo

Materials		Name:	
	HORMIGÓN DE SUELO	RECUBRIMIENTO DE STUCCO	
	HORMIGÓN LIGERO	Measure Tags (Optional):	
	HORMIGÓN PESADO	<i>Standard:</i>	<i>Standard Source:</i>
	LADRILLO		
BCL		<i>Standards Category:</i>	<i>Standards Identifier:</i>
	MEMBRANA DEL TECHO		
	RECUBRIMIENTO DE STUCCO	<i>Composite Framing Material:</i>	<i>Composite Framing Configuration:</i>
	YESO PAREDES EXTERIORES		
	YESO PAREDES INTERIORES	<i>Composite Framing Depth:</i>	<i>Composite Framing Size:</i>
No Mass Materials			
Air Gap Materials		<i>Composite Cavity Insulation:</i>	
Simple Glazing System Window Materials		Roughness:	Thickness:
Glazing Window Materials		Smooth	0.025300 m
		Conductivity:	Density:
		0.691800 W/m·K	1858.000000 kg/m ³
		Specific Heat:	Thermal Absorptance:
		837.000000 J/kg·K	0.900000
		Solar Absorptance:	Visible Absorptance:
		0.920000	0.920000

Figura 0-6 Propiedades recubrimiento de stucco

Materials

HORMIGÓN DE SUELO

HORMIGÓN LIGERO

HORMIGÓN PESADO

BCL

LADRILLO

MEMBRANA DEL TECHO

RECUBRIMIENTO DE STUCCO

YESO PAREDES EXTERIORES

YESO PAREDES INTERIORES

No Mass Materials

Air Gap Materials

Simple Glazing System Window Materials

Glazing Window Materials

Name:

YESO PAREDES EXTERIORES

Measure Tags (Optional):

Standard:

Standard Source:

Standards Category:

Standards Identifier:

Composite Framing Material:

Composite Framing Configuration:

Composite Framing Depth:

Composite Framing Size:

Composite Cavity Insulation:

Roughness:

Thickness:

Conductivity:

Density:

Specific Heat:

Thermal Absorptance:

Solar Absorptance:

Visible Absorptance:

Smooth

0.012700 m

0.160000 W/m·K

784.900000 kg/m³

830.000000 J/kg·K

0.900000

0.400000

0.400000

Figura 0-7 Propiedades de yeso paredes exteriores

HORMIGÓN DE SUELO	Name: YESO PAREDES INTERIORES
HORMIGÓN LIGERO	
HORMIGÓN PESADO	
LADRILLO	
MEMBRANA DEL TECHO	
RECUBRIMIENTO DE STUCCO	
YESO PAREDES EXTERIORES	
YESO PAREDES INTERIORES	
No Mass Materials	
Air Gap Materials	
Simple Glazing System Window Materials	Measure Tags (Optional): Standard: Standard Source: Standards Category: Standards Identifier: Composite Framing Material: Composite Framing Configuration: Composite Framing Depth: Composite Framing Size: Composite Cavity Insulation:
Glazing Window Materials	Roughness: MediumSmooth Thickness: 0.019000 m Conductivity: 0.160000 W/m·K Density: 800.000000 kg/m ³ Specific Heat: 1090.000000 J/kg·K Thermal Absorptance: 0.900000 Solar Absorptance: 0.400000 Visible Absorptance: 0.400000
Gas Window Materials	

Figura 0-8 Propiedades yeso paredes interiores

ConstructionsConstruction SetsConstructionsMaterials

Materials

ASLAMIENTO TEJADO

AZULEJO ACÚSTICO SUELO

CUBIERTA METÁLICA

HORMIGÓN DE SUELO

HORMIGÓN LIGERO

HORMIGÓN PESADO

LADRILLO

MEMBRANA TEJADO

RECUBRIMIENTO DE STUCCO

RECUBRIMIENTO YESO

YESO PAREDES INTERIORES

No Mass Materials

Drag From Library

Name:

AZULEJO ACÚSTICO SUELO

Measure Tags (Optional):

Standard:Standard Source:

Standards Category:Standards Identifier:

Composite Framing Material:Composite Framing Configuration:

Composite Framing Depth:Composite Framing Size:

Composite Cavity Insulation:

Roughness:

MediumSmooth

Thickness:

0.019100

m

Conductivity:

0.060000

W/m·KDensity:

368.000000

kg/m³

Specific Heat:

590.000000

J/kg·KThermal Absorptance:

0.900000

Solar Absorptance:

0.300000

Visible Absorptance:

0.300000

Figura 0-9 Propiedades azulejo acústico suelo

80

The screenshot shows a software interface for defining material properties. On the left, a sidebar lists various materials, with 'CUBIERTA METÁLICA' (Metal Roof) selected. The main panel displays the following properties and their values:

Property	Value	Unit
Name	CUBIERTA METÁLICA	
Measure Tags (Optional)		
Roughness	MediumSmooth	
Thickness	0.001500	m
Conductivity	45.006000	W/m·K
Density	7680.000000	kg/m³
Specific Heat	418.400000	J/kg·K
Thermal Absorptance	0.900000	
Solar Absorptance	0.600000	
Visible Absorptance	0.600000	

Figura 0-10 Propiedades cubierta metálica

No Mass Materials

Air Gap Materials

CÁMARA DE AIRE PAREDES

RESISTENCIA AL ESPACIO AÉREO DEL

Simple Glazing System Window Materials

Glazing Window Materials

Gas Window Materials

Name:

CÁMARA DE AIRE PAREDES

Measure Tags (Optional):

Standard:

Standard Source:

Standards Category:

Standards Identifier:

Thermal Resistance:

0.150000 m²·K/W

Figura 0-11 Propiedades cámara de aire paredes

No Mass Materials

Air Gap Materials

CÁMARA DE AIRE PAREDES

RESISTENCIA AL ESPACIO AÉREO DEL

Simple Glazing System Window Materials

Glazing Window Materials

Gas Window Materials

Name:

RESISTENCIA AL ESPACIO AÉREO DEL TECHO

Measure Tags (Optional):

Standard:

Standard Source:

Standards Category:

Standards Identifier:

Thermal Resistance:

0.180000 m²·K/W

Figura 0-12 Propiedades resistencia al espacio aéreo del techo

ANEXO III: ZONAS TÉRMICAS ISAAC PERAL

Name	All	Rendering Color	Turn On Ideal Air Loads	Air Loop Name	Zone Equipment	Cooling Thermostat Schedule	Heating Thermostat Schedule	Humidifying Setpoint Schedule	Dehumidifying Setpoint Schedule	Multiplier
	☐		Apply to Selected		Apply to Selected	Apply to Selected	Apply to Selected	Apply to Selected	Apply to Selected	Apply to Selected
Thermal Zone 1ª PLT E	☐		☒				TERMOSTATO			1
Thermal Zone 1ª PLT W Aula 40	☐		☒				TERMOSTATO			1
Thermal Zone 2ª PLT E Aula 52	☐		☒				TERMOSTATO			1
Thermal Zone 2ª PLT W	☐		☒				TERMOSTATO			1
Thermal Zone PASILLOS	☐		☒				TERMOSTATO			1
Thermal Zone SALA JUNTAS	☐		☒				TERMOSTATO			1
Thermal Zone TEJADO	☐		☒				TERMOSTATO			1

Figura 0-1 Zonas térmicas Isaac Peral

ANEXO IV: VARIACIÓN MENSUAL

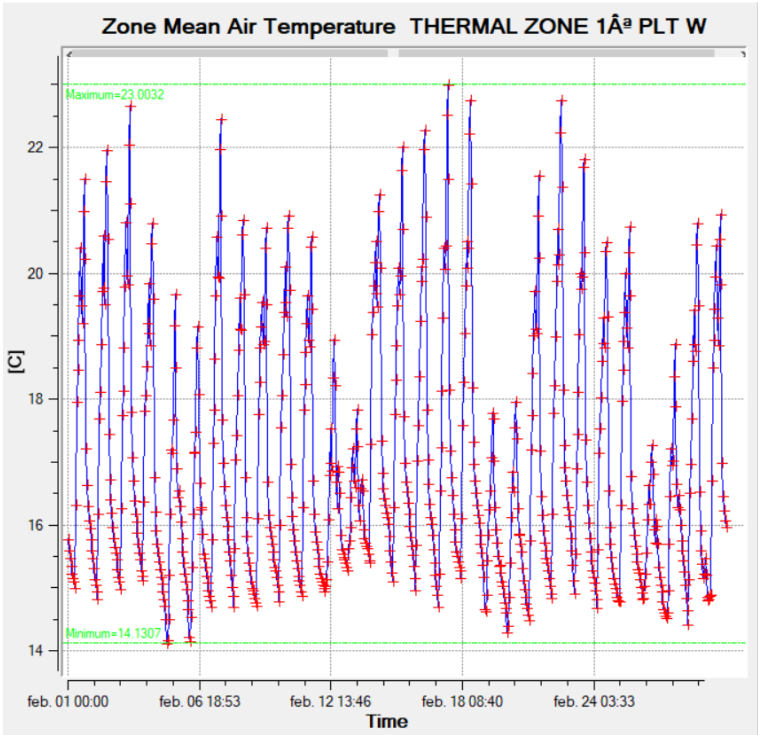


Figura 0-1 Temperatura mensual Aula 40

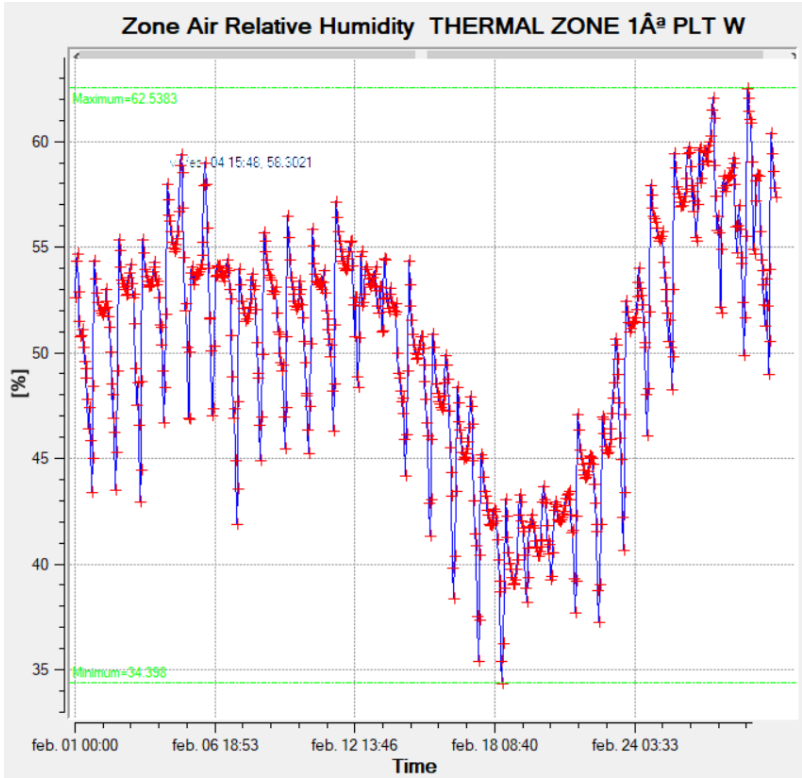


Figura 0-2 Humedad Relativa mensual Aula 40

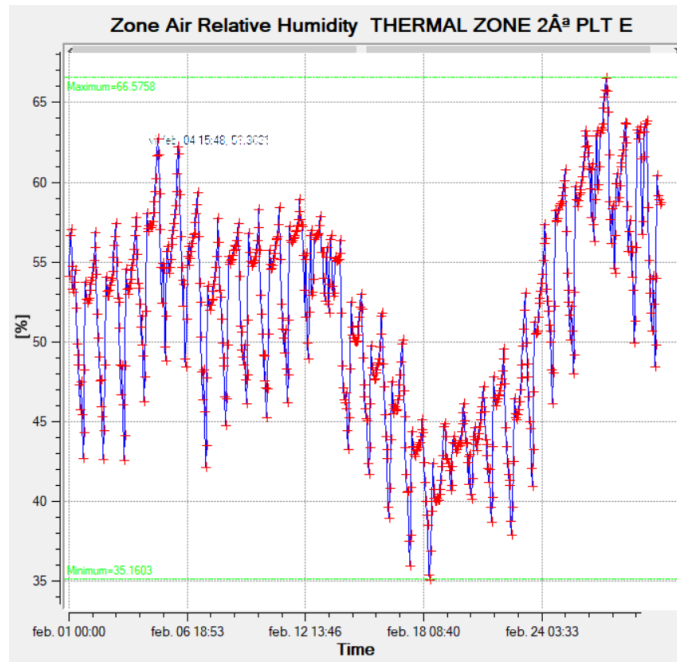


Figura 0-3 Temperatura mensual Aula 52

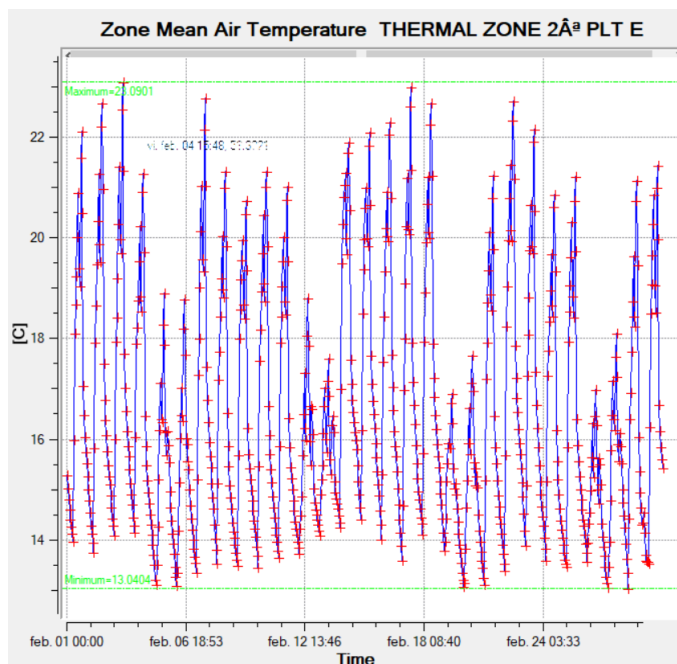


Figura 0-4 Humedad relativa mensual Aula 52

