

Trabajo de Fin de Máster

Máster Universitario en Ingeniería Industrial

Escuela Técnica Superior
de Ingeniería Industrial de Barcelona

Caracterización y diseño de un modelo reducido de salas de edificios educativos para combatir la pandemia



MEMORIA



Autor: Juan Tugores Garcias

Director: Lluc Canals Casals

Co-Directora: Alba Ruiz De Alegria Sala

Convocatoria: Enero de 2022

Resumen

En este trabajo se presenta el diseño de modelos de orden reducido que tienen como objetivo simular y analizar la evolución de la temperatura interior y la concentración de dióxido de carbono en salas educativas de la ETSEIB durante el horario lectivo. El presente informe se engloba dentro del proyecto ComMit-20 donde colaboran la UPC junto con el IREC.

En la primera parte del trabajo se realiza una búsqueda del estado del arte, tanto de las de la medidas adoptadas por la ETSEIB, a raíz de la COVID-19, como de los conceptos y regulaciones referentes al confort térmico y calidad de aire en el interior de los edificios.

A continuación se incluye la descripción de los modelos, mediante el método *Grey Box*, tanto el térmico como el de CO₂ utilizados para simular las salas. También se describe el proceso de toma de medidas realizado a lo largo del proyecto así como la caracterización de las aulas de estudio y los equipos utilizados en la monitorización.

Se presentan y evalúan, según las normativas pertinentes, los datos obtenidos durante la toma de medias. Posteriormente, se procede a la estimación de los parámetros desconocidos de los modelos y a la validación de los mismos a través de los valores reales adquiridos. Finalmente, se realiza una optimización de los modelos modificando los intervalos de estudio.

Además, el trabajo incluye la planificación de la ejecución del proyecto y un análisis del coste económico del proyecto donde se describen: los costes de los equipos utilizados para la monitorización, el personal involucrado, el consumo eléctrico y la amortización de equipos. También se ha analizado el impacto ambiental debido a la realización del proyecto.

Sumario

Resumen.....	3
Sumario.....	4
Glosario.....	6
1. Prefacio.....	9
1.1. Origen del Proyecto.....	9
1.2. Motivación.....	9
2. Introducción.....	10
2.1. Objetivos del Proyecto.....	10
2.2. Alcance del Proyecto.....	10
3. Estado del Arte.....	11
3.1. Consecuencias de la pandemia.....	11
3.2. Confort térmico.....	14
3.3. Normativa.....	16
3.3.1. RITE.....	16
3.3.2. ISO 7730: 2006.....	17
3.3.3. ASHRAE 55: 2017.....	18
4. Metodología.....	22
4.1. Técnicas de modelización.....	22
4.1.1. Grey BOX model.....	23
4.2. CTSM-R.....	24
4.3. Monitorización.....	26
4.3.1. Aula 10.15.....	27
4.3.2. Aula LS.4.....	28
4.3.3. Sensores.....	29
5. Modelización.....	30

5.1. Modelo térmico.....	30
5.2. Modelo de CO ₂	31
5.3. Estimación de parámetros.....	32
5.4. Validación del modelo.....	33
5.5. Modificación del modelo por tramos.....	34
6. Resultados y discusiones.....	35
6.1. Resultados de la Monitorización.....	35
6.2. Datos de monitorización (<i>OLD data</i>).....	37
6.3. Estimación de los parámetros.....	41
6.3.1. Modelo térmico.....	41
6.3.2. Modelo de CO ₂	43
6.4. Validación de los Modelos.....	46
6.5. Modelo por tramos.....	52
7. Planificación, Costes e Impacto.....	61
7.1. Planificación.....	61
7.2. Costes.....	62
7.3. Impacto ambiental.....	64
Conclusiones.....	66
Lineas futuras.....	68
Agradecimientos.....	69
Bibliografía.....	70
Anexo A: DataSheets.....	73
Anexo B: Código CTSM-R.....	75
Anexo C: Datos de Monitorización (<i>NEW data</i>).....	77
Anexo D: Modelo por Tramos: Parámetros.....	79

Glosario

AENOR: Agencia Española de Normalización

ASHRAE: American Society of Heating, Refrigeration and Air Conditioning Engineers

CAI: Calidad de aire interior

CTSM: Continuous Time Stochastic Modeling

DIPC: Departamento de Ingeniería de Proyectos y de la Construcción

EDO: Ecuación Diferencial Ordinaria

ETSEIB: Escola Tècnica Superior d' Enginyeria Industrial de Barcelona

IDAE: Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía)

IREC: Institut de Recerca en Energia de Catalunya

OMS: Organización Mundial de la Salud

PMV: Predicted Mean Vote

PPD: Predicted Percentage of Dissatisfied

RITE: Reglamento de Instalaciones Térmicas en Edificios

SDE: Stochastic differential equations

TFM: Trabajo de Fin de Máster

UPC: Universidad Politécnica de Cataluña

Índice de tablas

Tabla 1: Condiciones interiores de diseño de instalaciones de climatización según RITE. Fuente [8].....	17
Tabla 2: Categorías de ambiente térmico según ISO-7730. Fuente [9].....	18
Tabla 3: Parámetros estimados del modelo térmico. Fuente propia.....	41
Tabla 4: Matriz de autocorrelación del modelo térmico. Fuente propia.....	42
Tabla 5: Parámetros estimados del modelo de CO ₂ . Fuente propia.....	44
Tabla 6: Matriz de autocorrelación del modelo de CO ₂ . Fuente propia.....	44
Tabla 7: Errores Máximos entre el modelo y la realidad . Fuente propia.....	50
Tabla 8: Parámetros estimados del modelo térmico a tramos. Fuente propia.....	52
Tabla 9: Parámetros estimados del modelo CO ₂ a tramos. Fuente propia.....	53
Tabla 10: Parámetros para NEW data de los modelo a tramos. Fuente propia.....	56
Tabla 11: Errores Máximos entre los modelos y la realidad. Fuente propia.....	59
Tabla 12: Costes del proyecto. Fuente propia.....	63

Índice de figuras

Figura 1: Diagrama de las fuentes de contaminantes del aire interior. Fuente [12].....	14
Figura 2: Rangos aceptables de Temperatura: método gráfico ASHRAE. Fuente [11]...	19
Figura 3: Captura de pantalla de CBE Thermal Comfort Tool. Fuente [11].....	20
Figura 4: Aula 10.15. Fuente propia.....	27
Figura 5: Aula LS.4 Fuente propia.....	28
Figura 6: Sensor COMET (derch.) y sensor Elitech (izq). Fuente propia.....	29
Figura 7: RC del modelo térmico para Aula 10.15 y LS.4 Fuente propia.....	30
Figura 8: RC del modelo CO ₂ para Aula 10.15 y LS.4 Fuente propia.....	31
Figura 9: Monitorización de temperatura y CO ₂ del aula 10.15. Fuente propia.....	35
Figura 10: Monitorización de temperatura y CO ₂ del aula LS.4. Fuente propia.....	36

Figura 11: Monitorización térmica (OLD data). Fuente propia.....	38
Figura 12: Monitorización CO ₂ (OLD data). Fuente propia.....	40
Figura 13: Modelo térmico: Autocorrelaciones (sup.izq.) y Periodograma acumulado (sup.derech.) del Aula 10.15. Autocorrelaciones (inf.izq.) y Periodograma acumulado (inf.derech.) del Aula LS.4 Fuente propia.....	43
Figura 14: Modelo CO ₂ : Autocorrelaciones (sup.izq.) y Periodograma acumulado (sup.derech.) del Aula 10.15 y Autocorrelaciones (inf.izq.) y Periodograma acumulado (inf.derech.) del Aula LS.4). Fuente propia.....	45
Figura 15: Comparativa entre OLD data y los modelos (Aula 10.15). Fuente propia.....	46
Figura 16: Comparativa entre OLD data y los modelos (Aula LS.4). Fuente propia.....	47
Figura 17: Comparativa entre NEW data y los modelos (Aula 10.15). Fuente propia....	48
Figura 18: Comparativa entre NEW data y los modelos (Aula LS.4). Fuente propia.....	49
Figura 19: Comparativa entre OLD data y los modelos a tramos (Aula 10.15). Fuente propia.....	54
Figura 20: Comparativa entre OLD data y los modelos a tramos (Aula LS.4). Fuente propia.....	55
Figura 21: Comparativa entre NEW data y los modelos a tramos (Aula 10.15). Fuente propia.....	57
Figura 22: Comparativa entre NEW data y los modelos a tramos (Aula LS.4). Fuente propia.....	58
Figura 23: Planificación del proyecto (diagrama de Gantt). Fuente propia.....	61
Figura 24: Flujo de aspectos ambientales. Fuente: [21].....	64

1. Prefacio

Este trabajo final de máster (TFM) se desarrolla en el departamento de Ingeniería de Proyectos y de la Construcción (DIPC) de la *Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Industrial de Barcelona* (ETSEIB) y se enmarca dentro del proyecto ComMit-20.

El objeto de estudio del trabajo es la caracterización y modelización del confort térmico y la calidad del aire de una aula de la ETSEIB. El objetivo principal del trabajo es la toma de medidas relacionadas con los parámetros que afectan a la temperatura y al aire interior de las aulas, además de la creación y el análisis de un modelo reducido mediante circuitos eléctricos.

1.1. Origen del Proyecto

El presente trabajo tiene su origen en la colaboración entre la Universidad Politécnica de Cataluña (UPC) y el Institut de Recerca en Energia de Catalunya (IREC). Este informe se sitúa en la línea del proyecto ComMit-20, que está dirigido por el Dr. Jaume Salom e involucra a diversos grupos de investigación como la unidad ECOS (Grupos de investigación de Energía Térmica y Rendimiento de Edificios, Sistemas de Potencia y Analítica de Sistemas de Energía del IREC), así como a investigadores de la UPC y sus grupos de investigación: GRIC (Grupo de Investigación e Innovación de la Construcción) y GIIP (Grupo de Investigación en Ingeniería de Proyectos) [1].

1.2. Motivación

La causa de la realización de este Trabajo de Fin de Master es analizar el ambiente en las aulas de estudiantes y las consecuencias debido a las obligaciones de climatización impuestas por el gobierno surgidas a raíz de pandemia.

2. Introducción

A continuación se exponen los objetivos principales tanto del proyecto colaborativo como del presente informe, además de establecer el alcance del mismo.

2.1. Objetivos del Proyecto

El objetivo del proyecto ComMit-20 es el de establecer el impacto a largo y corto plazo de la situación de la pandemia COVID-19 con respecto al consumo de energía, cambios en los patrones de uso y mayores requisitos de calidad ambiental interior en los edificios. El proyecto propondrá medidas de adaptación orientadas, políticas y recomendaciones para aumentar la resiliencia de los edificios y las comunidades urbanas mediante la integración de los nuevos requisitos encontrados en las herramientas de diseño y planificación energética y los sistemas de gestión energética [1].

El presente TFM tiene como fin la fase de realización de un modelo reducido de aulas de estudiantes. Para poder caracterizar dicho modelo, se monitorizarán varias aulas cuyos datos se utilizarán los para crear y validar dicho modelo. Además, una vez creado y validado el modelo, se podrá utilizar para estimar qué sistemas de ventilación o acondicionamiento del aire son los más adecuados en cada caso. También se buscará comparar cómo se comportan las aulas en diferentes situaciones y estaciones del año.

2.2. Alcance del Proyecto

El alcance del proyecto es el de estudiar y analizar el confort térmico y la calidad de aire de dos aulas, en concreto las aulas 10.15 y LS.4 del edificio de la ETSEIB, la primera mediante ventilación natural (ventanas abiertas) y la segunda con ventilación forzada.

Se realizará una toma de medidas de la temperatura interior y temperatura exterior, además de un control de la concentración de CO₂, durante el horario lectivo mediante sensores térmicos del interior de las aulas.

Por otra parte, para la creación y validación del modelo eléctrico reducido, se utilizará el método *Grey Box* y el lenguaje R de programación. Dicho modelo será verificado y, en caso de que sea válido, será utilizado para determinar la idoneidad del ambiente térmico y proponer escenarios y mejoras.

3. Estado del Arte

A continuación se presentan la información correspondiente al conocimiento previo de la temática del proyecto. Primero se contextualiza la situación actual de la pandemia en la UPC y, posteriormente, se define los términos de confort térmico y calidad de aire así como los documentos actuales para su regulación.

3.1. Consecuencias de la pandemia

La pandemia COVID-19 comenzó a finales de 2019 y se extendió rápidamente por todo el mundo en cuestión de meses. El 11 de marzo de 2020, la Organización Mundial de la Salud (OMS) declaró al público la emergencia sanitaria provocada por el nuevo coronavirus, una pandemia internacional. Debido a la alta tasa de transmisión, la mayoría de los países tomaron medidas para detener la propagación, incluido el bloqueo de ciudades, la implementación estricta del aislamiento de contacto, y precaución estricta del sistema médico. Esta reducción de la movilidad de la población provocó que las instituciones de educación superior cancelaran las clases presenciales y adoptaran un aprendizaje a distancia [2].

Desde el primer confinamiento, la enseñanza virtual ha sido una realidad en las universidades. Cada institución tenía una forma particular de afrontar este proceso y, en grandes universidades como la UPC, las escuelas tenían la capacidad de decidir sus propios caminos siguiendo las directivas de la presidencia.

En el caso de estudios de ingeniería tradicionales, esto supuso un desafío importante ya que es un campo en que una gran parte del plan de estudios se basa en la aplicación práctica de conocimientos y, en gran medida, en clases prácticas y de laboratorio presenciales. Aunque bien es cierto que, con la ayuda de la tecnología y la creación de nuevas plataformas digitales, se ha podido seguir con la metodología tradicional o apenas a variado.

Sin embargo estudios realizados por la UPC [2], concluyen que la mayoría de los estudiantes no estaban satisfechos con la calidad de su educación en línea reforzada durante el bloqueo debido a la pandemia, y que creen que ha afectado negativamente a su experiencia académica. Además, el desarrollo académico de los estudiantes se

correlaciona con la calidad de la docencia, la adecuación de las asignaciones, las condiciones del espacio de trabajo, y el contacto con otros estudiantes y profesores [2].

Estos resultados indican que es necesario considerar cómo se deben adaptar los cursos al formato en línea ya que su calidad y su correcta adaptación repercutirán en el desarrollo académico. Por eso no resulta extraño que, tanto la comunidad estudiantil como el personal docente, hayan priorizado en los primeros meses del curso académico 2021-22 retomar la actividad presencial en las universidades, respetando las restricciones sanitarias impuestas por los organismos del gobierno.

Actualmente se encuentra vigente el Plan de contingencia de la UPC (última actualización 14/10/2021) que prevé modalidades de docencia, medidas organizativas y de protección, generales y específicas, que deben ser adaptadas a la organización de la Universidad. Entre ellas, destacan las siguientes medidas sobre aforos, confort y climatización en las aulas [3]:

- Las actividades académicas teóricas presenciales, se planificarán con una presencialidad simultánea del estudiantado de hasta un 80 % del aforo máximo de las aulas, previsión que podrá ser reformulada según la evolución del control de la pandemia. Considerando que el contexto epidemiológico sea favorable, las actividades docentes universitarias, las prácticas y las evaluaciones seguirán siendo presenciales.
- La distancia mínima interpersonal de seguridad se mantiene en 1,5 m o en aquella que determine la normativa de aplicación, excepto en los espacios donde se realicen actividades docentes, que vendrá determinada por el aforo o por otras medidas específicas. En las aulas docentes se respetará el aforo establecido maximizando el espacio interpersonal, adaptando la situación de las sillas en el aula cuando estas se puedan mover.
- El uso de mascarilla y su obligatoriedad en los diferentes espacios de los centros de trabajo se adecuará a las resoluciones e indicaciones de las autoridades sanitarias vigentes en cada momento. En el momento de la realización del presente documento, el uso de la mascarilla es obligatorio en cualquier espacio interior universitario y, en el exterior, según lo establecido por la autoridad sanitaria.

- Los edificios disponen de ventilación natural mediante ventanas y puertas. Dicha ventilación debe ser cruzada y continua. Para que la ventilación sea más efectiva, se provocarán flujos de aire cruzados, abriendo ventanas y puertas que se encuentren opuestas entre sí a fin de que corra el aire, de modo que el aire interior se renueve con el aire exterior. Ventanas y puertas deberán mantenerse abiertas el máximo tiempo que sea posible.
- En los espacios donde se realicen las actividades docentes presenciales y prácticas de laboratorio, se deberá llevar un registro de los asistentes potenciales y deberán preverse medidas de ventilación y de circulación de los asistentes. Al finalizar la actividad se abrirán las ventanas hasta el inicio de la siguiente, con el objetivo de favorecer la renovación del aire.

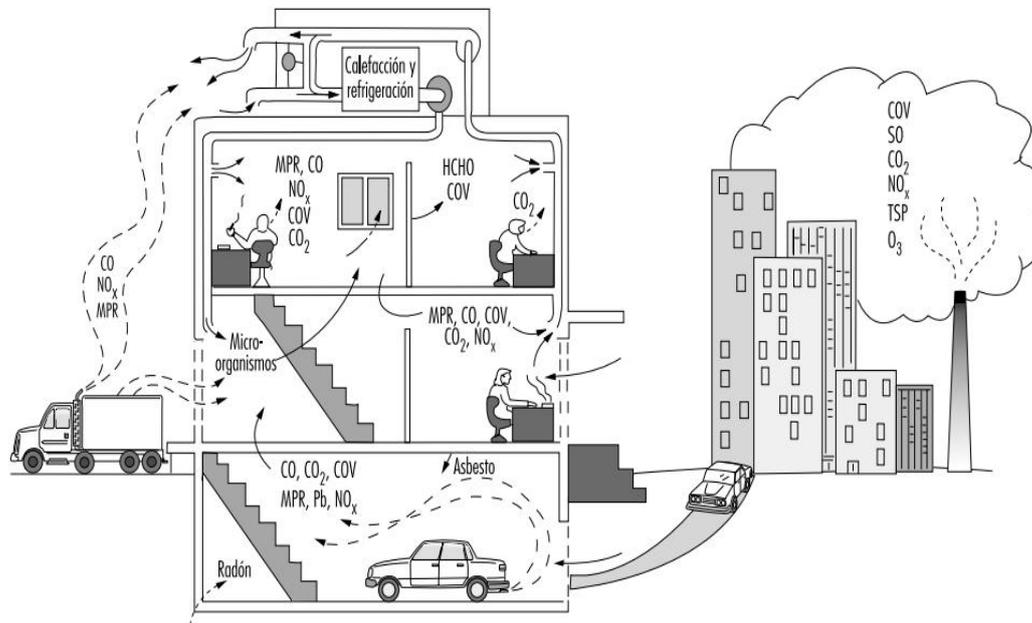
Las medidas establecidas por la UPC suponen un cambio respecto a los años académicos anteriores a la pandemia en el confort de estudiantes dentro de las aulas. Además, las restricciones han dado paso a la necesidad de verificar la idoneidad del aire interior y su impacto energético, fisiológico y psicológico en la comunidad universitaria.

El término aire interior suele aplicarse a ambientes de interior no industriales: edificios de oficinas, edificios públicos (colegios, hospitales, teatros, restaurantes, etc.) y viviendas particulares. Las concentraciones de contaminantes en el aire interior de estas estructuras suelen ser de la misma magnitud que las encontradas habitualmente al aire exterior (figura 1) [12].

Los cambios en el estado de salud de una persona debidos a la mala calidad del aire interior pueden manifestarse en diversos síntomas agudos y crónicos así como en forma de diversas enfermedades específicas. Aunque los casos en que la mala calidad del aire interior da lugar al desarrollo completo de una enfermedad son pocos, puede causar malestar, estrés, absentismo laboral y pérdida de productividad de los ocupantes [13].

Cuando más del 20% de los ocupantes de un edificio se quejan de la calidad del aire o presentan síntomas claros se puede afirmar que existe el fenómeno conocido como síndrome del edificio enfermo (SEE) [13]. Suelen ir acompañados de las características siguientes: las personas afectadas presentan síntomas similares a los del resfriado común o a los de las enfermedades respiratorias; los edificios son eficientes en ahorro de la

energía y tienen un diseño y una construcción modernos o han sido remodelados recientemente con materiales nuevos, y los ocupantes no pueden controlar la temperatura, la humedad ni la iluminación de su lugar de trabajo.



CO = monóxido de carbono; CO2 = dióxido de carbono; HCHO = formaldehído; NOx = óxidos de nitrógeno; Pb = plomo; MPR = materia particulada respirable; COV = compuestos orgánicos volátiles.

Figura 1: Diagrama de las fuentes de contaminantes del aire interior. Fuente [12]

3.2. Confort térmico

Al carecer de sistemas de ventilación y calefacción forzada y/o controlable en la mayor parte de las aulas de la ETSEIB, la ventilación obligada del punto 3.1. mediante la apertura de ventanas tiene un impacto evidente en la temperatura del aula, afectando al confort térmico de los usuarios (especialmente en invierno).

El confort térmico es la sensación que expresa la satisfacción de los usuarios de los edificios con el ambiente térmico. Por lo tanto es subjetivo y depende de diversos factores. Una de las funciones principales de los edificios es proveer ambientes interiores que son térmicamente confortables.

Entender las necesidades del ser humano y las condiciones básicas que definen el confort es indispensable para el diseño de edificios que satisfacen los usuarios con un mínimo de equipamiento mecánico [4].

En la actualidad, existen dos teorías diferentes relacionadas con la definición de confort térmico. Las dos coexisten, y cada una tiene sus límites y potencialidades. Por un lado tenemos la teoría del balance térmico, basada en un modelo estacionario de condiciones contantes, y por otro la teoría adaptativa que tiene más en cuenta la actuación del usuario.

Los modelos de balance térmico, también llamados estáticos o constantes, definen los parámetros que influyen en el confort y dos índices para cuantificarlo PMV (*Predicted Mean Vote*) y PPD (*Predicted Percentage of Dissatisfied*).

- El PMV predice el valor medio de los votos sobre la sensación térmica que emitirá un grupo de personas sometidas al mismo ambiente. El PMV es utilizado para comprobar si un ambiente térmico determinado satisface los criterios de comodidad y para establecer los requisitos de los diferentes niveles de aceptabilidad. Al fijar $PMV = 0$, se establece una relación que predice las combinaciones de actividad, vestimenta y térmica neutra.
- El PPD es un índice que establece una predicción cuantitativa del porcentaje de personas que se sentirán insatisfechas en un determinado ambiente térmico por notar demasiado frío o demasiado calor. Ambos índices se pueden relacionar mediante la ecuación (1):

$$PPD = 100 - 95 \cdot \exp[-(0,03353 \cdot PMV^4 + 0,2179 \cdot PMV^4)] \quad \text{ec.(1)}$$

Para la obtención del PMV, el Doctor P. Fanger (un estudioso en los campos del confort térmico y en la percepción de los entornos habitados y cerrados) obtuvo su ecuación de confort a través de varios estudios estáticos en cámaras climáticas [5]. El modelo PMV-PPD de Fanger es ampliamente utilizado y aceptado en el campo de la evaluación del confort térmico. Sin embargo se trata de un modelo estacionario, por lo tanto no tiene en cuenta las variaciones de temperatura a lo largo del día y solo es aplicable a humanos expuestos a un largo periodo en condiciones constantes y con una tasa metabólica constante [4].

Por otro lado, el confort adaptativo tiene su origen en los numerosos estudios de campo que, con métodos principalmente estadísticos, han desarrollado modelos de confort a partir del registro de las sensaciones y el comportamiento de ocupantes regulares en edificios reales. Muchos de esos estudios descubrieron que los modelos matemáticos de

confort, como el de Fanger, eran poco adecuados para predecir la sensación de confort en ciertos edificio [6].

Los investigadores Dear y Brager (1998) plantean que, en términos generales, la adaptación se puede describir como la reducción gradual de la respuesta de un organismo a una estimación repetitiva del ambiente [7]. Y que dentro de esa definición general es posible distinguir tres tipos de adaptación ambiental: ajuste de comportamiento, cambios fisiológicos y cambios psicológicos.

El modelo final se puede expresar mediante la ecuación (2) [6], donde la $T_{p,ext}$ es la temperatura promedio exterior del bulbo seco, es decir, la verdadera temperatura del aire húmedo y que con frecuencia se la denomina sólo temperatura del aire (la que marca un termómetro común).

$$T_{conf} = 17,6 + (T_{p,ext} \cdot 0,31) \quad \text{ec. (2)}$$

3.3. Normativa

Con el objetivo de establecer unos rangos de bienestar en lo referente al confort térmico y a la calidad del aire interior, los profesionales se apoyan en estándares para diseñar correctamente los espacios. Son finalmente estas normalizaciones las que determinan la manera en la que se construyen los edificios. Por este motivo es fundamental analizar las principales normas del diseño de ambientes interiores.

Actualmente existen tres estándares internacionales que tiene gran impacto sobre el confort térmico en el interior de edificios **ASHRAE 55** y **ISO 7730**, así como la normativa vigente en España, el **RITE** (Reglamento de Instalaciones Térmicas en Edificios). Sobre la calidad de aire interior , todos ellos remeten a la norma **ASHRAE**.

3.3.1. RITE

El Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios y su aplicación es obligatoria en los edificios de nueva construcción, y en los ya construido,s en lo relativo a su reforma, mantenimiento, uso e inspección.

Esta norma no dispone de una apartado determinado para el confort térmico, sin embargo lo más parecido que podemos encontrar es el de calidad térmica de un ambiente.

La exigencia de calidad térmica se considera satisfecha en el diseño y dimensionado de la instalación térmica si los parámetros que definen el bienestar térmico se mantienen en la zona ocupada dentro de los valores establecidos a continuación [8].

Estación	Temperatura operativa °C	Humedad relativa %
Verano	23...25	45..60
Invierno	21...23	40...50

Tabla 1: Condiciones interiores de diseño de instalaciones de climatización según RITE. Fuente [8]

Los valores de la tabla 1 son válidos para nivel de actividad sedentaria, correspondiente a una tasa metabólica de 1,2 met, con un nivel de vestimenta de 0,5 clo en verano y 1 clo en invierno y un PPD entre 10 y 15%. Para otros valores de nivel de actividad o vestimenta la norma deriva al estándar ISO 7730.

3.3.2. ISO 7730: 2006

Se trata de un estándar internacional que presenta métodos para predecir la sensación térmica general y los grados de disconfort de las personas expuestas a climas térmicos moderados. Esto permite la determinación analítica e interpretación del confort térmico usando valores de PMV y PPD, además de criterios de confort local, dadas las condiciones consideradas aceptables para el confort térmico general tanto como para el disconfort local [4]. Según la norma, se puede determinar el PMV de uno de los modos siguientes [9]:

- Utilizando la ecuación de Fanger (apartado 3.2.1.) mediante el lenguaje de programación *BASIC* de ordenador.
- A partir del anexo E de la normativa, que proporcionan tablas con valores del *PMV* para diferentes combinaciones de actividad, vestimenta, temperatura operativa y velocidad relativa.
- Mediante medida directa, empleando un sensor integrador que mida la temperatura equivalente y temperatura operativa.

Según el anexo A de la normativa [9], el ambiente térmico deseado para un espacio puede ser seleccionado de entre tres categorías, A, B y C (tabla 2). Todos los criterios deberán ser satisfechos simultáneamente para cada categoría:

Categoría	Estado térmico del cuerpo en su conjunto		Incomodidad local			
	PPD %	PMV	DR%	PD %		
				diferencia de temperatura vertical del aire	provocada por suelo caliente o frío	asimetría radiante
A	<6	-0,2<PMV<+0.2	<10	<3	<10	<5
B	<10	-0,5<PMV<+0.5	<20	<5	<10	<5
C	<15	-0,7<PMV<+0.7	<30	<10	<15	<10

Tabla 2: Categorías de ambiente térmico según ISO-7730. Fuente [9]

Donde DR es la tasa de corriente de aire, es decir, la incomodidad debida a las corrientes de aire se calcula a partir de de la norma ISO. Por último, el parámetro PD esta relacionado con la incomodidad debida a la diferencia de temperatura entre la cabeza y los tobillos [9].

3.3.3. ASHRAE 55: 2017

La norma realizada por *The American Society of Heating, Refrigeration and Air Conditioning Engineers* (ASHRAE), cuantifica seis de los factores ambientales que influyen en las condiciones de confort térmico. Aunque estos factores son variables en el tiempo, el estándar especifica que solo está dirigido a confort térmico en estados estáticos. Actualmente existe una versión más actualizada, la de 2020, pero no ha sido posible acceder al detalle.

Para ello, la norma diferencia las condiciones requeridas para confort térmico entre espacios acondicionados mecánicamente y espacios acondicionados naturalmente, de este modo plantea dos métodos diferentes según qué tipo de edificio se trate.

Para los edificios que cuentan con sistemas mecánicos de climatización, el estándar ASHRAE 55 ofrece tres opciones que permiten evaluar las condiciones de confort [10].

- **El método gráfico:** se basa en el modelo PMV y emplea un diagrama psicrométrico para definir dos zonas de confort que se superponen parcialmente, una para invierno y otra para verano. Como se observa en la figura 2 (una versión simplificada del diagrama original), estas zonas establecen límites de temperatura operativa y humedad relativa dentro de los cuales, teóricamente, la gran mayoría de las personas se sentirían en confort. Si las condiciones ambientales en el interior de un edificio quedan dentro de esos rangos, entonces se asume que este cumple con el criterio del método.

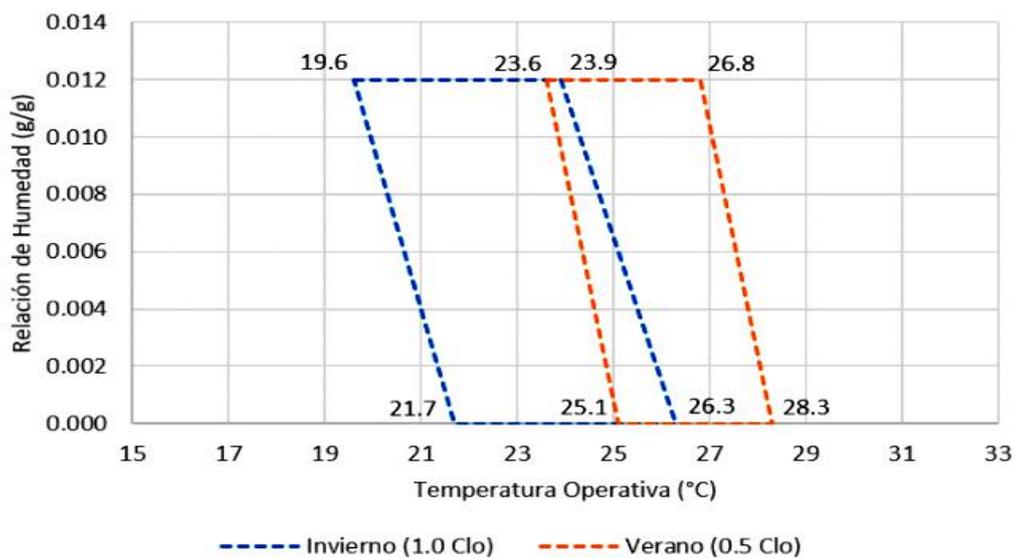


Figura 2: Rangos aceptables de Temperatura: método gráfico ASHRAE. Fuente [11]

- **El método analítico:** se utiliza para evaluar el confort cuando no es posible respetar algunas de las restricciones del método gráfico. En ese sentido, ofrece un poco más de flexibilidad para verificar el cumplimiento del estándar. Este método también se basa en el modelo de PMV, pero implica el uso de herramientas computacionales para calcular directamente sus indicadores de confort (figura 2), es decir la sensación térmica y el porcentaje de personas en disconfort [10]. Una de esas herramientas es la CBE Thermal Comfort Tool.

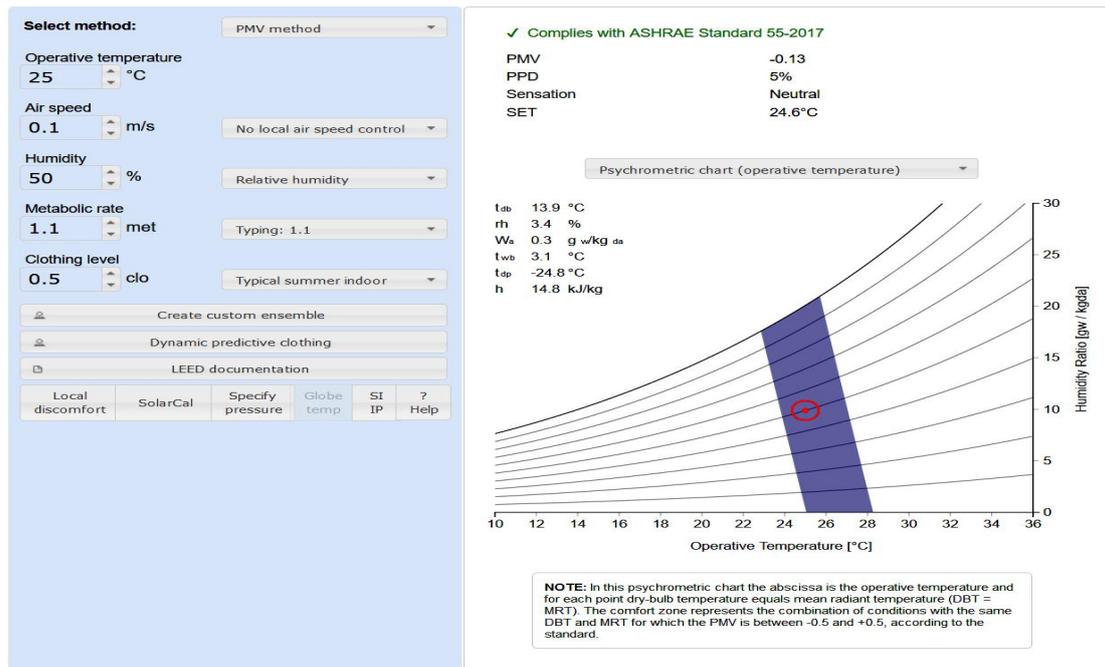


Figura 3: Captura de pantalla de CBE Thermal Comfort Tool. Fuente [11]

- **El método de zona de confort de velocidad de aire elevada:** se permite utilizar en los espacios donde el efecto de enfriamiento de aire es superior al permitido en los métodos anteriores, lo que se traduce a una velocidad superior a 0,2 m/s (Anexo D de la normativa [10]). Este método combina el método analítico junto con el método SET (*Standard Effective Temperature*), definido en la norma, el cual permite calcular y obtener la nueva zona de confort debido a la elevada velocidad del aire.

El establecimiento de un reglamento está encaminado a limitar o reducir los niveles de contaminación en el aire interior. Tal objetivo puede alcanzarse controlando las fuentes de contaminación existentes, diluyendo el aire interior con aire exterior y comprobando la calidad del aire disponible. Se requiere para ello el establecimiento de límites máximos específicos para los contaminantes presentes en el aire interior [12].

Existen normas para la calidad del aire (CAI) en el exterior establecidas con el fin de proteger a la población general. Dichas normas se han obtenido determinando los efectos adversos sobre la salud que causa la exposición de los contaminantes en el medio ambiente. Son directrices generales útiles para conseguir una calidad aceptable del aire interior; las propuestas por la Organización Mundial de la Salud (OMS) son un ejemplo de estas normas [12].

Actualmente, ASHRAE, ha elaborado una serie de normas y recomendaciones muy utilizadas para la valoración de la calidad del aire interior. En la norma de la ASHRAE, se especifican las cantidades mínimas de aire necesarias para ventilar un edificio, así como la calidad del aire interior aceptable para sus ocupantes con el fin de prevenir efectos adversos sobre la salud [14].

El dióxido de carbono o CO₂ se utiliza como indicador de la calidad del aire interior para establecer el correcto funcionamiento de los sistemas de ventilación, esta norma recomienda un límite de 1.000 ppm en escuelas para cumplir los criterios de bienestar [14]. En esta norma también se especifica la calidad del aire atmosférico requerida para la renovación del aire interior.

4. Metodología

En este apartado se define la metodología utilizada para la creación y validación de los modelos reducidos de las aulas. Primero se expondrá el sistema de ecuaciones en las que se basarán. También se indica el software utilizado para construir los modelos y las simulaciones. Por último se explicara como se realiza la monitorización de los parámetros de las aulas además de su caracterización.

4.1. Técnicas de modelización

El modelado es la aplicación de métodos para analizar complejos problemas del mundo real para hacer predicciones sobre qué podría suceder con varias acciones. Los modelos matemáticos van desde los modelos de caja blanca (*white box*) hasta los modelos de caja negra (*black box*).

Un modelo matemático de caja blanca o mecanicista se basa en el enfoque deductivo o teórico. Aquí, las teorías y principios fundamentales que gobiernan el sistema junto con los supuestos simplificadores se utilizan para obtener relaciones matemáticas entre las variables que se saben o que se suponen significativas. El modelo resultante se puede calibrar con datos históricos del sistema real y validarse con datos adicionales.

Por el contrario, un modelo matemático de caja negra o empírico se basa en un enfoque inductivo, es decir, en datos que se utilizan para desarrollar relaciones entre variables que se consideran significativas en el sistema en estudio. El modelo refleja sólo los cambios que podrían esperarse en el rendimiento del sistema debido a cambios en las entradas. A pesar de que el valor de utilidad de este enfoque se limita a las predicciones, ha demostrado ser útil en el caso de sistemas complejos donde la ciencia subyacente no se comprende bien.

El modelo de caja gris (*grey box*) surge como una combinación de los dos anteriores, aprovechando el conocimiento de las propiedades físicas que gobiernan el sistema junto con los datos estadístico propios del modelo empírico. Los modelos aplicados en el presente trabajo son modelos de caja gris y consisten en un conjunto de ecuaciones diferenciales estocásticas (SDE) acopladas a un conjunto de ecuaciones de medición de tiempo discretas [15].

4.1.1. Grey BOX model

Los modelos de caja gris se componen de una función determinista y una parte estocástica que representa una ecuación diferencial estocástica en tiempo continuo para la descripción física de un sistema. Finalmente, se necesita una observación en tiempo discreto del sistema físico subyacente para estimar los parámetros, en general desconocidos. La combinación de datos físicos y experimentales se puede utilizar para identificar la parametrización adecuada del modelo [16].

En el modelado de grises, el primer paso es formular el sistema de EDOs (Ecuación Diferencial Ordinaria) que representa las relaciones físicas ordinarias: $f(\dots)$, se conoce como *drift term*. A este término se le añade uno estocástico llamado proceso Weiner y que se le conoce como *drag term*, $G(\dots)$, de esta manera se introduce una entrada ruidosa en el sistema. El sistema se describe en la ecuación (3):

$$dX_t = f(X_t, U_t, \theta, t)dt + G(\theta, t)d\omega_t \quad \text{ec. (3)}$$

- t es la variable de tiempo (t_k donde $k=0, \dots, N$ indica los instantes de muestreo),
- X_t es un vector de variables de estado,
- U_t es un vector de variables de entrada (*inputs*),
- θ es un vector de parámetros, posiblemente desconocidos.

Finalmente, en la ecuación (4), la salida monitorizada del sistema Y_{t_k} (*outputs*) se utiliza para completar la representación del espacio de estados [16]:

$$Y_{t_k} = h(X_t, U_t, \theta, t)dt + e_t \quad \text{ec. (4)}$$

- $h(\dots)$ representa la relación entre las variables de estado y las medidas,
- e_t es vector de ruido de las mediciones, el cual se asume que sigue una distribución gaussiana.

Conociendo las variables de entrada del sistema (*inputs*) y las salidas (*outputs*), obtenidas mediante medición, se puede estimar los parámetros θ en el modelo de tiempo continuo, utilizando el método de máxima verosimilitud [16]. La literatura recomienda el

uso de softwares para la calibración, en concreto la librería CTSM-R [16]. Por último, se utiliza el mismo sistema de ecuaciones diferenciales ordinarias, con los parámetros estimados, para completar el modelo y poder realizar las simulaciones pertinentes [17].

El modelado de caja gris se ha utilizado con éxito en el sector de la construcción para modelar la demanda de energía térmica de un edificio [16]. Debido al mínimo esfuerzo computacional requerido por el modelado en caja gris y su aceptable precisión, es adecuado para su implementación en sistemas de gestión energética de edificios, con control predictivo.

Con el objetivo de modelar y simular el confort térmico y la calidad de aire de las aulas mediante modelos de *Grey Box*, se ha recurrido a dos ejemplos que se encuentran en la literatura sobre dinámica térmica [18] y concentración de CO₂ [16]. Ambos modelos serán la base para construir los sistemas de ecuaciones que describan los procesos físicos de las aulas de la ETSEIB.

4.2. CTSM-R

Para poder implementar los diferentes modelos se ha utilizado la librería CTSM (*Continuous Time Stochastic Modeling*) del software estadístico de R (para este proyecto se ha trabajado en la versión 4.1.2). Esta librería proporciona un marco para la identidad y estimación de modelo estocásticos *grey box* [19]. Para construir cada modelo, primero es necesario inicializarlo utilizando la función:

```
modelo <- ctsm()
```

Esta función genera un objeto de clase **ctsm** al que se le asocia el nombre de **modelo**. Este objeto es un conjunto de métodos ligados al *grey box mode* que se usan para incluir la estructura del modelo y los límites de los parámetros. Seguidamente, es necesario introducir todas las ecuaciones diferenciales de la parte dinámica del modelo mediante el comando:

```
modelo$addSystem(fórmula)
```

Donde *fórmula* hace referencia a la ecuación diferencial de sistema, utilizando el criterio adecuado del lenguaje de R para escribirla. También se debe introducir la ecuación de

medida del modelo de partida mediante el comando:

```
modelo$addObs(fórmula)
```

A continuación, es necesario añadir los diferente *inputs* de los que se disponga, es decir, todos los datos que se han obtenido, utilizando el código a continuación, donde *símbolo* especifica que variables de las ecuaciones son inputs externos:

```
modelo$addInput(símbolo)
```

Para que se pueda realizar la estimación de los parámetros desconocidos del modelo, utilizando el método de máxima verosimilitud, es necesario introducir los valores iniciales para las variables de estado y los parámetros, así como para los límites superiores e inferior:

```
Model$setParameter(a=c(init=valor,lower=valor,upper=valor))
```

Finalmente, para obtener la estimación del modelo, se aplica la siguiente línea de código donde se realizara la interpretación para determinar si la estimación es coherente con lo observado en la realidad.

```
fit <- modelo$estimate(data=datos)
```

```
summary(fit, extended=TRUE)
```

Este comando crea una matriz que incluye los parámetros estimados y su desviación típica, junto con otras variables de optimización, y la matriz de correlación de las estimaciones realizadas:

- **Estimate:** El valor del parámetro estimado,
- **Std. Error:** La desviación del parámetro estimado,
- **t value:** El valor del estadístico t,
- **Pr(>|t|):** La probabilidad de que el valor inicial de la variable o el parámetro sea significativo, es decir igual a 0. Si este valor no es pequeño (>0,05) puede ser que el modelo este sobreparametrizado,

- **dF/dPar:** La derivada de la función objetivo respecto a la variable o parámetro. Si este valor no es cercano a 0, la solución encontrada no podría ser un óptimo real y se debería modificar la configuración,
- **dPen/dPar:** La derivada de la función de penalización respecto a la variable o parámetro. Si el valor es significativo comparado con el valor anterior, la estimación podría ser cercana a los límites y habría que modificarlos.

4.3. Monitorización

Como se ha comentado al inicio del informe, el objetivo del proyecto es crear un modelo para analizar y simular el confort térmico y la calidad de aire en aulas de estudiantes. Para tal propósito se han monitorizado dos aulas distintas ubicadas en el edificio ETSEIB.

La monitorización se ha realizado durante horario lectivo, es decir, durante las clases teóricas de *Gestión de Proyectos* (asignatura de Q7 del Grado en Tecnologías Industriales) impartidas por Lluç Canals, el director del presente TFM. Las clases se han impartido, por una parte, en el Aula 10.15, miércoles y viernes de 10-12 h, y en el aula LS.4, martes y viernes de 12:30 a 14 h.

En los diferentes días de monitorización, se han recogido los valores de varios parámetros que influyen en la dinámica térmica y de aire, como son: temperatura interior y humedad relativa interior del aula, presencia de CO₂ en interior, temperatura exterior de la sala (en la zona de tránsito del interior del edificio, vea sé los pasillos) y la ocupación del aula.

También, en cada una de las clases, se han realizado dos encuestas sobre el confort térmico de los usuarios: una a mitad de la clase y otra al acabar, con el fin de determinar el confort térmico del estudiante durante la realización de las clases.

Todos los datos mencionados con anterioridad se han obtenido mediante 3 sensores, dos ubicados en el interior de la sala y uno en los pasillos, con la supervisión de dos observadores: Juan Tugores (autor del presente TFM) y la estudiante de doctorado Alba Ruiz de Alegría (colaboradora del proyecto COMIT-20 en la ETSEIB).

Los modelos reducidos dependen de las propiedades físicas del sistema de estudio. En el caso de la caracterización dinámica que se pretende analizar, estos modelos dependen de las características térmicas de las aulas y de los elementos que suponen una generación tanto de calor como de CO₂. A continuación se presentan con más detalle las características técnicas de las distintas aulas.

4.3.1. Aula 10.15

El Aula 10.15 (figura 4) se encuentra en el décimo piso del edificio H de la ETSEIB, en el *Departamento de Ingeniería de Proyectos y de la Construcción*. Tiene un aforo de aproximadamente 30 personas y cuenta con una pizarra, un proyector, un ordenador de sobremesa y gran parte del mobiliario, mesas y sillas, son de libre manipulación. Tiene, aproximadamente, una superficie de 48 m² y un volumen de 140 m³.

La climatización de la sala se realiza mediante la calefacción central del edificio H, que se activa según la temperatura exterior del ambiente. La calefacción del edificio solo se puede encender o apagar por cada planta, pero no es posible regular caudal, temperatura o controlarla por zonas.

Está delimitada por otras dos salas de estructura similar, un pasillo (que la conecta con los ascensores) y la fachada que cuenta con cinco ventanas orientadas al sur-oeste, que únicamente dos se pueden abrir. Además, la pared que conecta el aula con el pasillo cuenta con una puerta, cuatro ventanas fijas, una rejilla de impulsión de la calefacción central y otra rejilla de extracción. La mayoría de cerramientos verticales están compuestos de ladrillo macizo y una capa de yeso.



Figura 4: Aula 10.15. Fuente propia

4.3.2. Aula LS.4

El aula LS.4 (figura 5) se encuentra ubicada en el bloque L de la ETSEIB, que consta de varias aulas “modernas” (en comparativa a las situadas en el bloque H principal) bajo tierra. Tiene un aforo aproximado de 40 personas. Está rodeada por una zona de tránsito, es decir el pasillo, y otra aula de las mismas características.

Cuenta con 2 pizarras, 1 proyector, 1 ordenador de sobremesa, 3 pantallas y la mayoría del mobiliario es de libre manipulación. Su superficie es de 80 m² y su volumen total es de aproximadamente de 240 m³. Todas las paredes carecen de ventanas a excepción de la entrada que, además de una puerta, esta formada por cuatro ventanales translúcidos fijos. Los cerramientos están compuestos por planchas de pladur con un acabado en yeso.

Posee un equipo de climatización automático que se activa cuando la temperatura interior es menor de 21 °C o mayor de 26 °C (rangos de activación en invierno). Este sistema también puede ser encendido por los usuarios, en caso, solo se activará cuando la temperatura de la sala se encuentre dentro de el rango programado. Por otro lado, cuenta con un sistema de renovación de aire automático que se activa cuando la concentración de CO₂ medida es superior a 900 ppm.

En la parte trasera, sobre la pizarra, se ubican las diferentes rejillas de impulsión y extracción de los sistemas de climatización. En la zona superior-central de la sala, en el falso techo, se encuentran los sensores de temperatura interna propios del sistema del aula.



Figura 5: Aula LS.4 Fuente propia

4.3.3. Sensores

Para la obtención de los parámetros en el interior de la sala se han utilizado 2 sensores *Datalogger U3430* de la marca **COMET** (figura 6). Este dispositivo está diseñado para registrar temperatura, humedad y CO₂. La grabación se realiza cada minuto (modificable) en una memoria electrónica no volátil y los datos se puede transferir a una PC a través de USB-C.

En cuanto a las medidas obtenidas en las zonas exteriores, es decir, en la zona de los pasillos donde se encuentran las aulas, se ha dispuesto un sensor de **Elitech RC-5** (figura 4). Este aparato, a diferencia del anterior, tan solo mide la temperatura y la recolección de datos se obtiene a través de una conexión mediante USB 2.0 A en el PC. Los datos técnicos de ambos dispositivos se incluyen en el Anexo A.



Figura 6: Sensor COMET (derch.) y sensor Elitech (izq). Fuente propia

5. Modelización

Partiendo los modelos de ejemplo presentados en la literatura sobre dinámica térmica [18] y de concentración de CO₂ [17] y a través de las características de las aulas determinadas en el apartado 4.3. se han construido los siguientes modelos para analizar la dinámica interior de cada una de las aulas.

5.1. Modelo térmico

El modelo más simple y completo que se puede construir a través de los datos obtenidos en el apartado 4.2. es el que solo considera la variable de estado T_i , es decir, la temperatura interior de la sala [18]. Esta temperatura se ha obtenido mediante los sensores COMET (el valor medio entre ambos) y será el valor que verificaremos al realizar la estimación del modelo.

La ecuación dinámica del modelo (ecuación 5) se basa en el principio físico de transmisión de calor entre elementos y, para la validación mediante CTSM-R del modelo se ha utilizado la ecuación 6 (ecuación de medida):

$$dT_i = \frac{1}{R_{ie}C_i}(T_e - T_i)dt + \frac{1}{C_i}(\Phi_h + P\cdot\Phi_p)dt + e^{p11}d\omega_1 \quad \text{ec. (5)}$$

$$yT_i = T_i + e_{11} \quad \text{ec. (6)}$$

En la representación eléctrica del modelo (figura 7) se puede observar los elementos que influyen en la dinámica de térmica de las salas, donde:

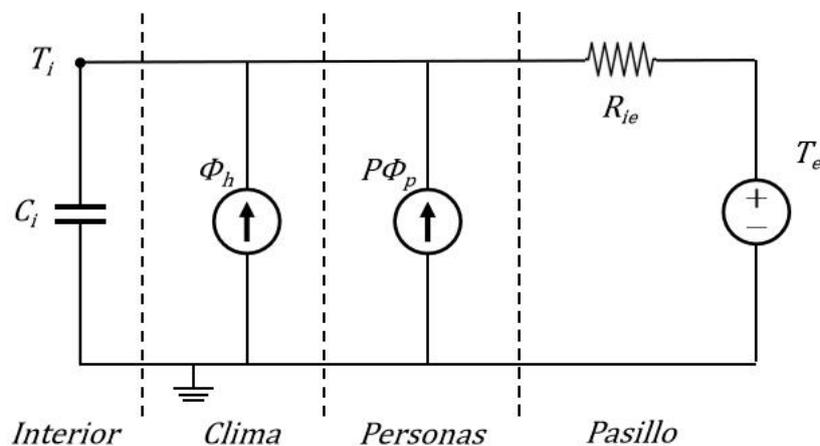


Figura 7: RC del modelo térmico para Aula 10.15 y LS.4 Fuente propia

- C_i es la capacidad térmica del interior (mobiliario),
- Φ_h es el calor medio generado por los aparatos de climatización y electrónicos de la sala. No se ha tenido en cuenta la generación de calor debido a la radiación solar; ya que el aula LS.4 se encuentra bajo tierra y en la 10.15 las ventanas están orientadas al sur-oeste y, a la hora de las mediciones (Noviembre 9-12 h), había mínima incidencia de sol,
- $P \cdot \Phi_p$ es el calor generado por los usuarios del aula. La ocupación ha sido determinada mediante el proceso de monitorización, sin embargo el calor generado por cada individuo, Φ_p , se ha obtenido de la normativa del IDAE (*Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía*) [20], que establece una generación de calor sensible de 0,7 kW por persona para una actividad de trabajo muy ligero (sentado),
- R_{ie} es la resistencia térmica entre el interior y la envolvente,
- T_e es la temperatura del exterior de la sala, véase, la temperatura observada en el pasillo mediante el sensor Elitech.

5.2. Modelo de CO₂

Con los valores obtenidos de la concentración de CO₂ en el apartado de monitorización, se ha realizado el siguiente modelo *grey box* basándose en los ejemplos de la literatura [16]. Para este modelo se ha considerado la concentración interior del aire (C_{int}) como la variable de estado, medida que se ha obtenido gracias a las medidas de los sensores COMET (la media entre ambos). El esquema eléctrico correspondiente se muestra en la figura (8) donde:

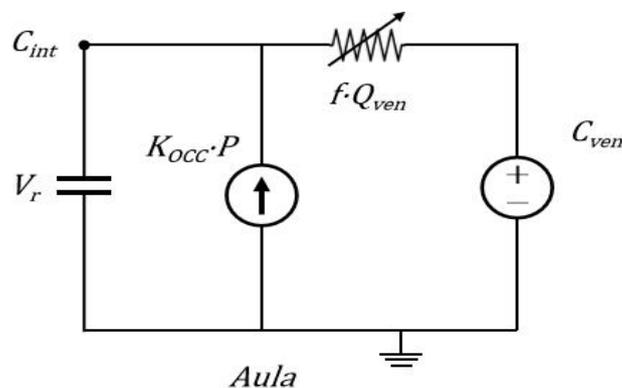


Figura 8: RC del modelo CO₂ para Aula 10.15 y LS.4 Fuente propia

- C_{int} y C_{ven} son las concentraciones de CO₂ del aire interior y del aire de ventilación, respectivamente,
- $f \cdot Q_{ven}$ es el caudal de ventilación, que se refiere tanto al caudal generado por el sistema de ventilación forzada en la LS.4 como a la natural de la 10.15. La variable f es un input de carácter binario que indica cuando se ha abierto (1) o cerrado (0) los sistemas de renovación de aire,
- V_r es el volumen del aire en la sala. Este volumen viene determinado por la sala y se ha obtenido por inspección directa,
- K_{occ} es el ratio de emisión por ocupante y P es el número de ocupantes. La ocupación viene dada por el proceso de monitorización, pero para el ratio de emisión se utilizó un valor fijo de 12,748 mg/h [16].

Para este segundo modelo, la función determinista se basa en el principio de balance másico en un volumen específico, donde la concentración de CO₂ se puede expresar a través de la ecuación 7:

$$dC_{int} = \frac{f \cdot Q_{ven}}{V_r} (C_{ven} - C_{int}) dt + \frac{K_{occ} \cdot P}{V_r} dt + e^{p22} d\omega_2 \quad \text{ec.(7)}$$

Por último, la ecuación de medida del sistema utilizado en este informe viene descrita por la ecuación 8:

$$yC_{int} = C_{int} + e_{22} \quad \text{ec.(8)}$$

5.3. Estimación de parámetros

Previamente a la validación del modelo es necesario realizar una estimación de los parámetros desconocidos del sistema de cada modelo, vea sé:

- **Modelo Térmico:** la capacidad térmica, la resistencia térmica, el calor generado en la sala (a excepción de los usuarios) y los parámetros referentes al ruido (p_{11}) y el error (e_{11}). Para esta estimación, se utilizará la temperatura interna (yT_i) como variable de medida y, como *inputs* del sistema, la ocupación de la sala (P) y la temperatura del exterior (T_e). Para el parámetro Φ_h , al no poseer ningún valor aproximado (ya sea porque son sistemas centrales y no regulables o porque

dependen de la situación climática del día de medida) el modelo tan solo determinará un valor medio de calor aportado.

- **Modelo CO₂:** la concentración del aire exterior (C_{ven}), el caudal de ventilación (Q_{ven}) y los parámetros referentes al ruido (p_{22}) y el error (e_{22}). Para esta estimación, se utilizará la concentración interna (γC_{int}) como variable de medida y, como *inputs* del sistema, la ocupación de la sala (P) y la apertura o cierre de los sistemas de ventilación (f).

La estimación se ha realizado con las medidas obtenidas de los días del proceso de monitorización. Para el modelo térmico se han utilizado las del 19 de Noviembre del 2021, de 9:50-12 h (10.15) y de 12:30-14 h (LS.4). Y, en el caso del modelo de CO₂, las medidas corresponden al 26 de Noviembre de 2021 de 9:30 a 12 h para el aula 10.15 y de 12:30 a 14:50 h para la LS.4 Estas medidas para la calibración del modelo se han designado a lo largo del informe como **OLD data**.

5.4. Validación del modelo

Tras la estimación de los parámetros de los modelos se realiza la validación de los mismos con la ayuda de la base de datos obtenida durante la monitorización. El proceso consiste en determinar la temperatura y la concentración de CO₂ interior de la sala (T_{int} y C_{int}) que se obtiene mediante el modelo completo (con los parámetros obtenidos en el apartado 5.3.) y compararla con las medidas observadas de los sensores COMET.

Para tal propósito se validará tanto con los *inputs* usados para obtener los parámetros (**OLD data**) como con nuevos datos (**NEW data**) de otro día de monitorización. De este modo se podrá comprobar si la estimación es correcta y si se puede extrapolar a otras condiciones.

La validación con los nuevos datos se ha realizado con los siguientes periodos de monitorización. Para el aula 10.15 se han utilizado los valores de 1 de diciembre (10-12:30 h) y para la LS.4 las del 30 de Noviembre (12:30-14 h), ambas del año 2021. Debido a la sencillez de las EDOs de los modelos, las validaciones se han realizado mediante WPS Office, un paquete gratuito y open source alternativo a Microsoft Office.

5.5. Modificación del modelo por tramos

Uno de las suposiciones base del los modelos (5.1. y 5.2.) es la estimación de parámetros desconocidos, variables en el tiempo, como parámetros contantes independientes de la situación ambiental de las aulas. En concreto, los parámetros son: el calor térmico medio generado (Φ_h) y el caudal de ventilación (Q_{ven}). Si en las aulas se abre o se cierra la calefacción y/o la ventilación, tanto forzada como natural, los valores estimados de los modelos pueden variar según el tiempo (tanto temporal como climático) y, por lo tanto, tienen un importante impacto en la respuesta del modelo.

Es por eso que se ha realizado una segunda estimación y validación de los distintos modelos de ambas aulas con el objetivo de diferenciar las variables de respuesta (T_{int} y C_{int}), según los cambios referente al clima interior de las salas observados durante la monitorización. Es decir, diferenciar los diversos parámetros (R_{ie} , C_i , Φ_h y C_e , Q_{vent}) a medida que se modifica el sistema.

De la misma manera que en los modelos iniciales, se realizará la estimación de los nuevos parámetros (apartado 5.3.) por tramos y la validación del mismo (apartado 5.4.).

6. Resultados y discusiones

A continuación se exponen los resultados obtenidos en las diferentes fases del proyecto. Por una parte, se presentan los datos obtenidos de las monitorizaciones realizadas. Por otra parte, se muestran los modelos de caja gris realizados, así como los parámetros estimados obtenidos y la validación de los modelos.

6.1. Resultados de la Monitorización

El proceso de monitorización engloba más de 20 horas de datos recopilados de temperatura y concentración de CO₂ en el interior de la aulas de estudio. En las figuras 9 y 10 se representan las medidas obtenidas, clasificada por días, según el tipo de aula. También se incluyen los límites estipulados por las normativas (RITE y ASHREA) en líneas rojas.

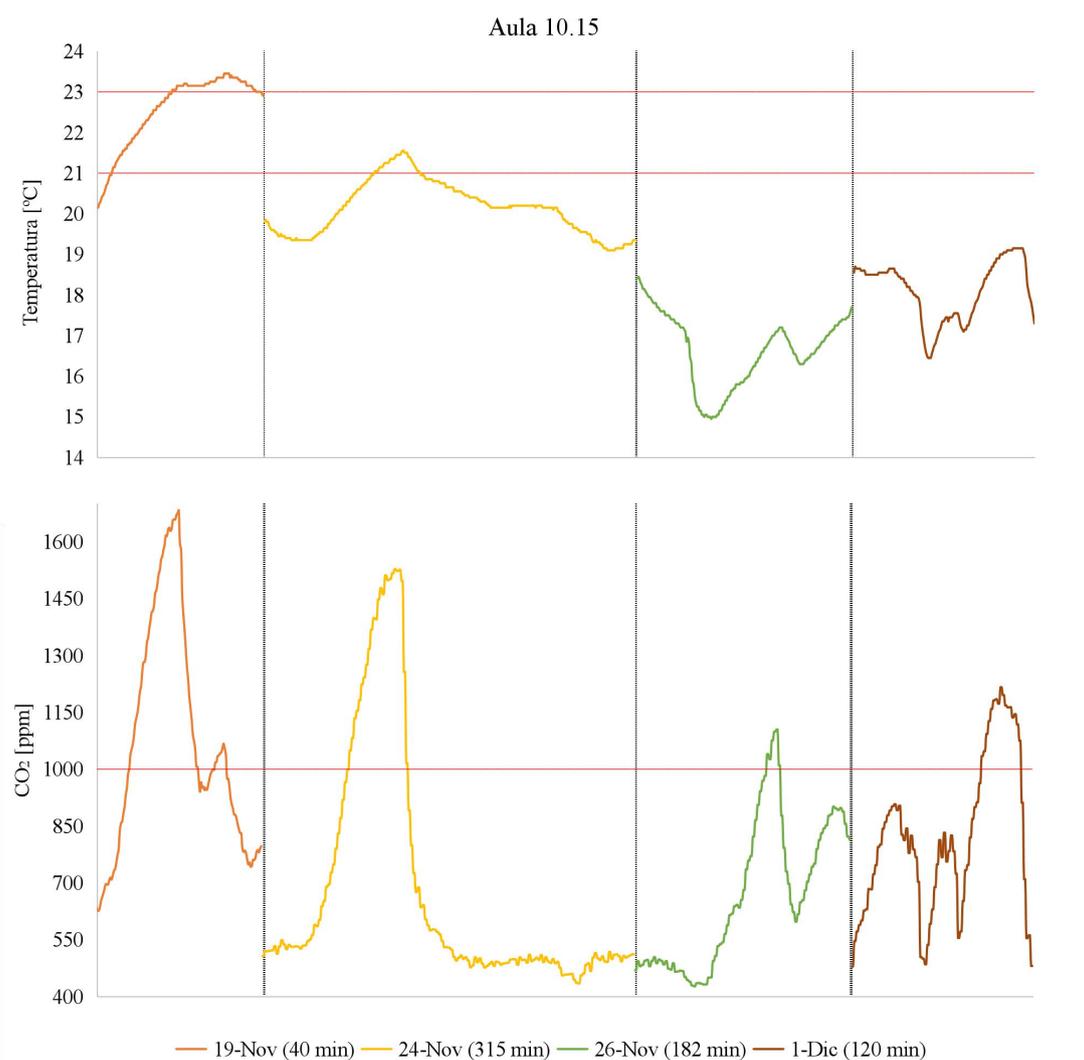


Figura 9: Monitorización de temperatura y CO₂ del aula 10.15. Fuente propia

Como se observa en la figura 10, el aula 10.15 que posee una sistema de ventilación natural presenta una temperatura inferior a 21 °C durante más del 80 % del periodo de monitorización. Estos valores son mínimos durante los días 26 de Noviembre y 1 de Diciembre, fechas donde se mantuvieron las ventanas completamente abiertas en el transcurso de la clase como estipula el protocolo COVID de la escuela.

En lo referente a la concentración de CO₂, se ve que durante los días donde no se mantenía una ventilación constante el valor superaba 1500 ppm (19 y 24 de Noviembre). Los otros periodos, donde había ventilación natural la mayor parte del día, el valor medio de la concentración oscilaba 800 ppm.

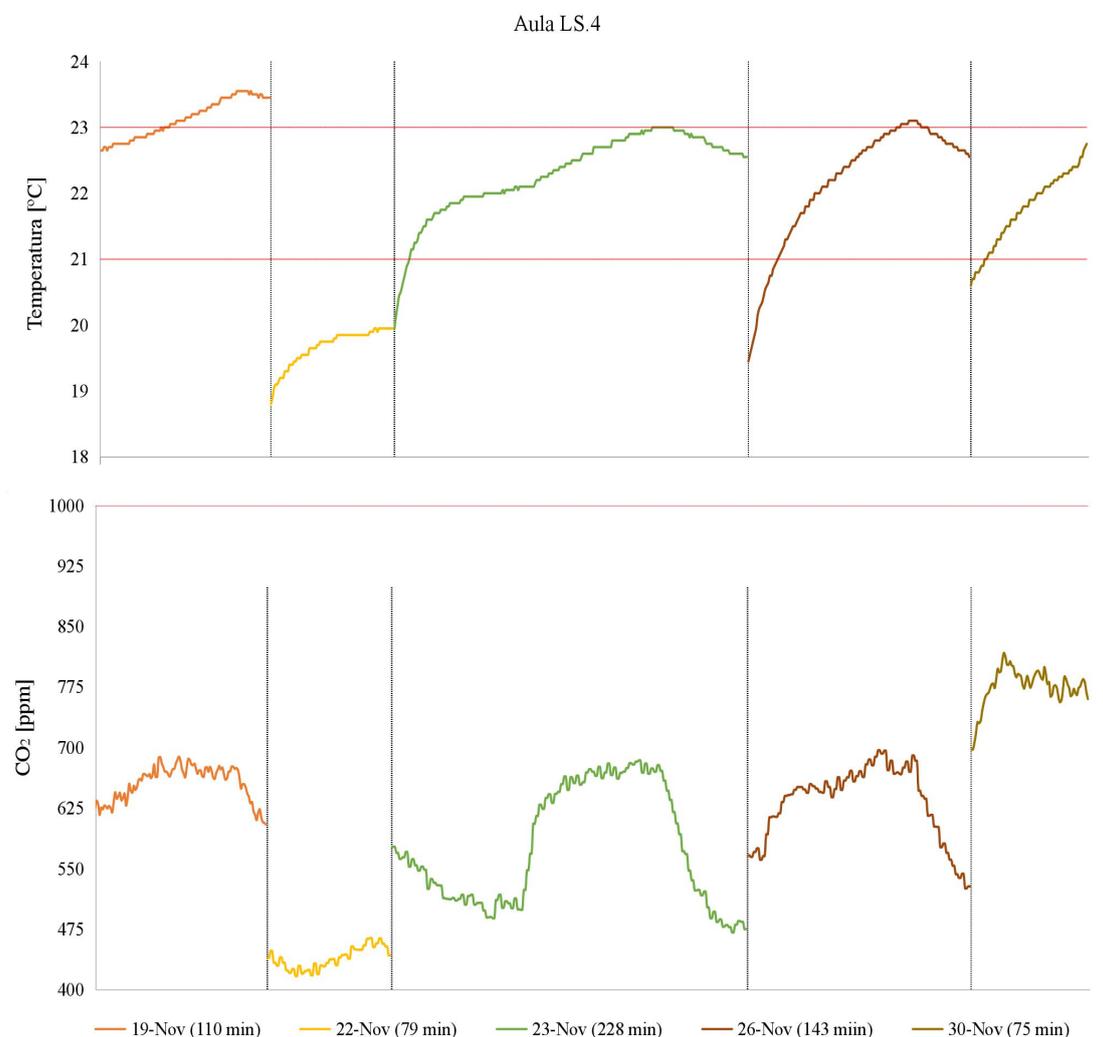


Figura 10: Monitorización de temperatura y CO₂ del aula LS.4. Fuente propia

Analizando las medidas tomadas del aula LS.4 (figura 10), vemos que la temperatura media de los diversos días es de 22 °C. El único periodo que difiere es el del 22 de Noviembre donde la temperatura esta entre 19 °C y 20 °C, no obstante fueron datos que se obtuvieron cuando no había usuarios en el interior del aula. En el caso del CO₂, la concentración no supera los 750 ppm y sigue la dinámica esperada: aumenta cuando hay ocupación, se mantiene mientras está activada la ventilación forzada y decrece al finalizar la clase.

A continuación se ha realizado un pre-análisis siguiendo las reglas estipuladas por el RITE (apartado 3.3.1.) en cuanto a las condiciones de confort térmico (entre 21 y 23 °C) y las normativa ASHREA (apartado 3.3.3.) sobre la calidad de aire (>1000 ppm). Se han utilizado estos valores límite debido a que no se necesita un cálculo previo, tan solo una inspección directa de las medidas.

Por una parte, se puede determinar que el aula 10.15. no cumple ni con los requisitos de temperatura ni con los de dióxido de carbono. La temperatura interior esta siempre por debajo del límite de 21 °C si se mantiene las ventanas abiertas, como dicta el protocolo de actuación. Sin embargo, si estan cerradas, la acumulación de dióxido de carbono sobrepasa las 1000 ppm perjudicado a los usuarios. Por otra parte, el sistema de climatización de la sala LS.4 es más respetuosa con los usuarios. Los valores de temperatura se encuentran dentro del rango del RITE durante gran parte del período de horas lectivas y la concentración de CO₂ no sobrepasa los 800 ppm en ningún caso.

6.2. Datos de monitorización (*OLD data*)

El paso previo al modelado de las aulas es establecer y analizar los datos utilizados (*inputs*) para la estimación de parámetros y poder calibrar los modelos. Estas medidas se denominan, a lo largo del informe, como OLD data (apartado 5.3.).

En la figura 11, se muestran los valores correspondientes a la monitorización ara el caso del modelo térmico: la variable de medida (γT_i) y los valores correspondientes a los inputs del modelo (T_e y $People$). Estos valores corresponden al 19 de Noviembre del 2021 de 9:50 a 12 h (10.15) y de 12:30 a 14h (LS.4).

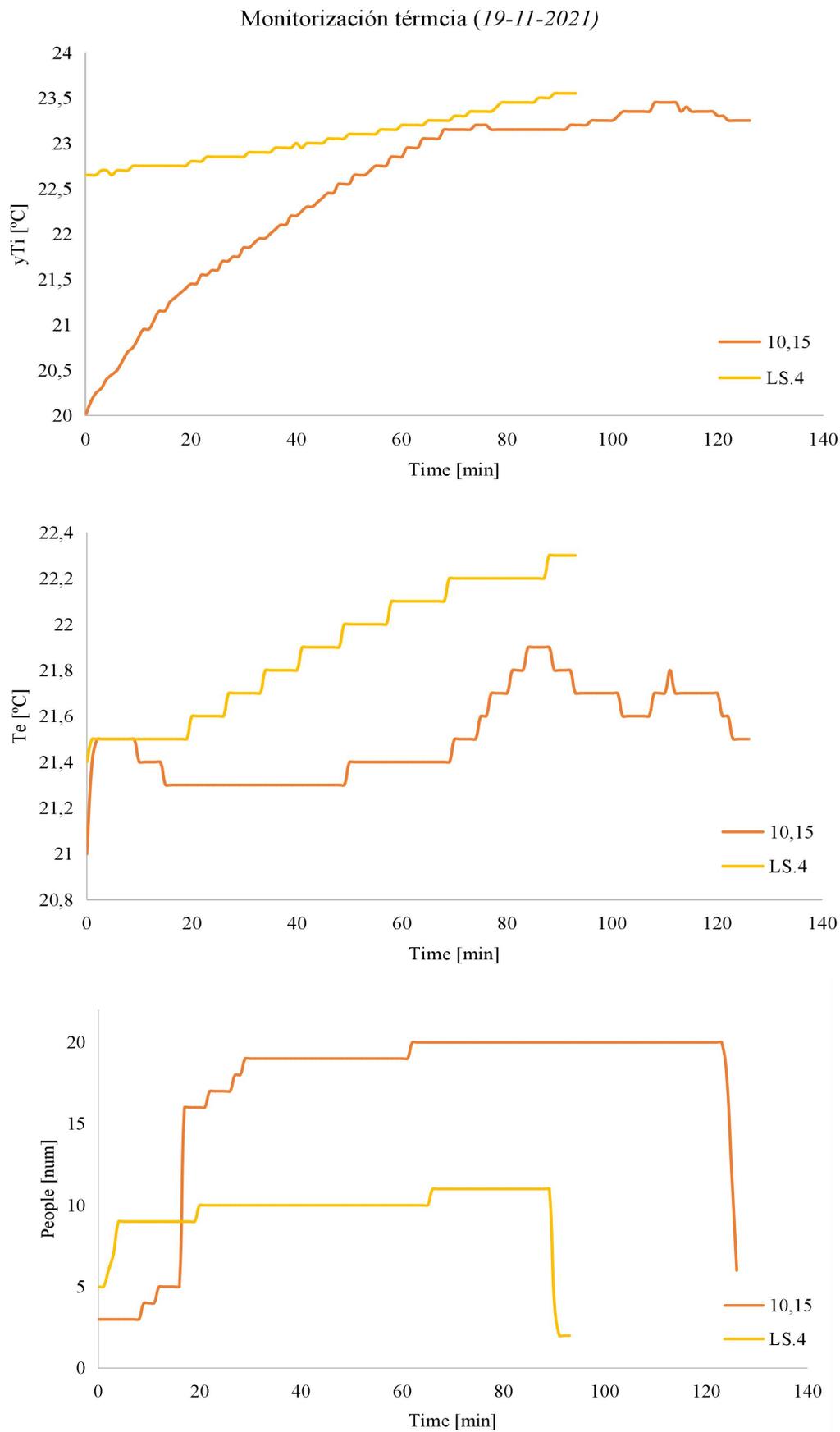
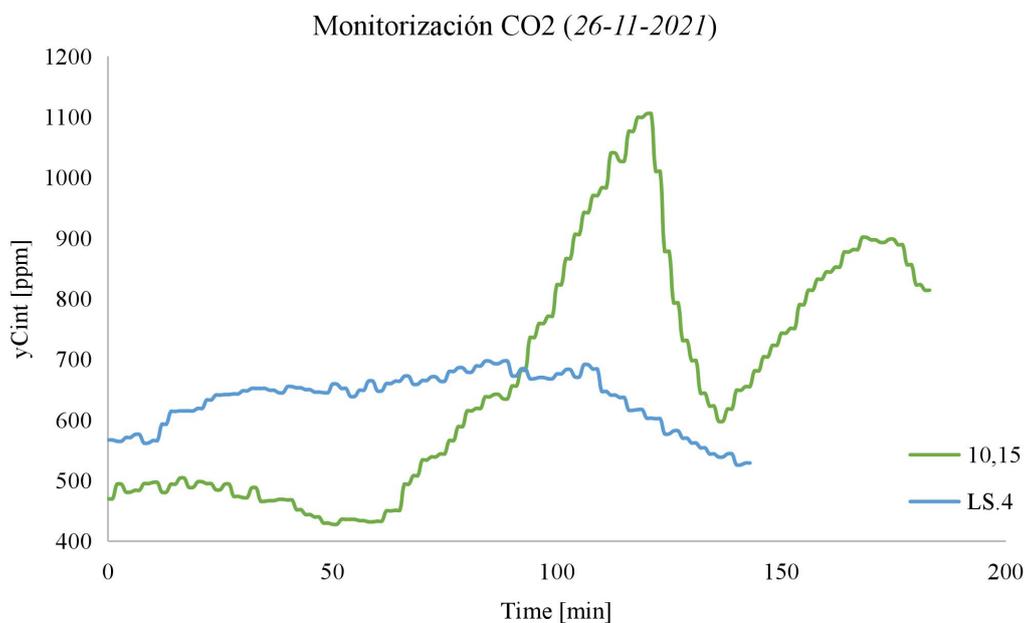


Figura 11: Monitorización térmica (OLD data). Fuente propia

Como vemos (figura 11), las temperaturas de las aulas a lo largo del periodo de medición se encuentran por debajo del rango determinado por el RITE (21-23 °C en invierno). El aula 10.15 inicia con 20 °C y va subiendo a medida que se va ocupando la sala hasta mantenerse a 23 °C gracias a la apertura de las ventanas. Del mismo modo, la LS.4 que se encontraba a unos de 22,5 °C, sigue una tendencia creciente a medida que va aumentando la ocupación.

Analizando la temperatura del pasillo anexo a las salas (T_e), observamos un valor de temperatura que oscila entre los rangos delimitados por la normativa (21-23), además se ve que la temperatura exterior del aula 10.15 es menor que la medida en la LS.4 Esto se debe a que el aula 10.15 está peor aislada y más en contacto con la fachada exterior, mientras que la LS.4 se encuentra en una planta baja. También existe una influencia causada por el periodo de cálculo, pues las observaciones de la 10.15 fueron echas durante las primeras horas lectivas donde la incidencia solar era baja.

Por otro lado, en la figura 12, se muestra la concentración del interior observada (yC_{int}), la presencia o no de ventilación (*ON/OFF*) y los usuarios (*People*). Los valores han sido obtenidos durante el siguiente día de la monitorización: 26 de noviembre de 2021 (9:30-12 h) para el aula 10.15 (12:30-14:50 h) para la LS.4



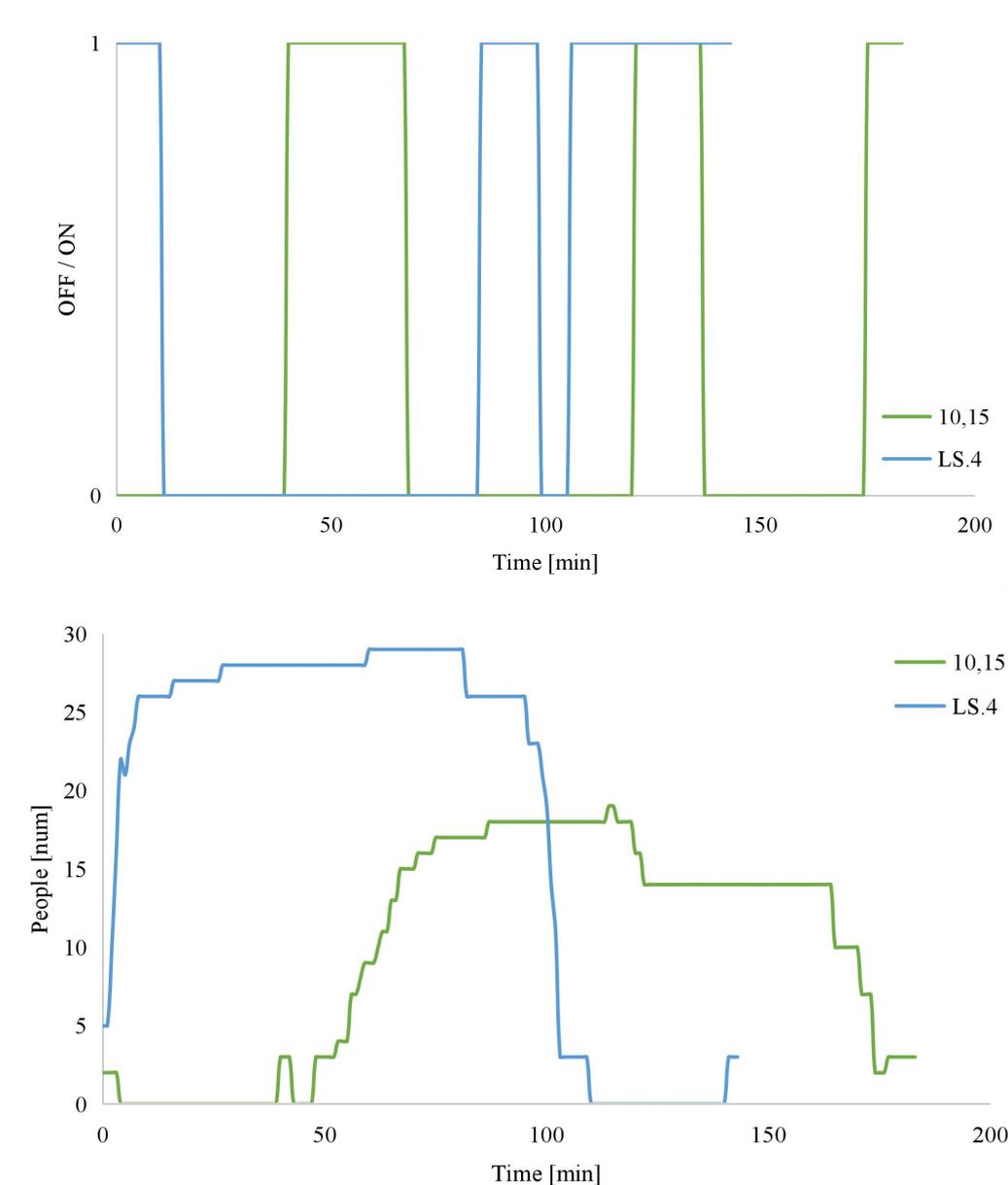


Figura 12: Monitorización CO₂ (OLD data). Fuente propia

En lo referente a la cantidad de CO₂ en el aire observado (figura 12), vemos que en caso del aula LS.4, que tiene un sistema de ventilación forzada automática, los niveles del gas no superan las 700 ppm. Sin embargo, para la 10.15 que solo posee ventilación natural, se observa que si las ventanas se encuentran cerradas y la ocupación del aula es máxima, el nivel de CO₂ en el aire alcanza picos de 1100 ppm.

Este valor se encuentra por encima del límite establecido por la normativa de ASHRAE (1000 ppm) determinado que la ventilación no cumple con la regulación estipulada. Aunque la duración del pico es de 20 min, cabe destacar que este valor podría haber sido más elevado, siguiendo la tendencia de la gráfica, si no se llegan a abrir las ventanas.

6.3. Estimación de los parámetros

A continuación se presentan los resultados obtenidos de la estimación de los parámetros y la validación de primer modelo térmico y de CO₂, para ambas aulas.

6.3.1. Modelo térmico

A partir de los inputs obtenidos de la monitorización (apartado 6.1.), el valor de los parámetros estimados del modelo térmico mediante CTSM-R se han recogido en la tabla 3:

Aula	Param	Estim	Error Std	Pr(< t)	dF/dPar	dPen/dPar
10.15	T _{i 0}	20,00	3,03e-02	0,00	7,035e-05	0,002
	C _i	865,33	57,8	0,00	-9,18e-05	0,06
	R _{ie}	3,44e-02	2,043e-03	0,00	-1,11e-06	0,00
	Φ _h	39,48	1,79	0,00	9,24e-05	0,59
	p ₁₁	-3,63	1,14e-01	0,00	6,21e-07	0,00
	e ₁₁	-8,22	3,35e-01	0,00	-1,52e-07	0,00
LS4	T _{i 0}	22,66	1,07e-02	0,00	-3,96e-03	0,01
	C _i	553,56	47,8	2,22e-16	6,29e-07	-0,007
	R _{ie}	1,26e-01	1,86e-02	1,67e-09	4,10e-04	0,00
	Φ _h	7,34	1,12	4,48e-09	-3,07e-04	-0,001
	p ₁₁	-5,31	4,07e-01	0,00	-1,07e-04	0,00
	e ₁₁	-8,17	2,02e-1	0,00	-1,86e-04	0,00

Tabla 3: Parámetros estimados del modelo térmico. Fuente propia

Observando la tabla 3, vemos que los valores obtenidos de capacidad (C_i) y resistencia térmica (R_{ie}) son razonables: más elevados para el aula 10.15 (865,33 kJ/°C y 0,034 °C/kW) que en la LS.4 (553,56 kJ/°C y 0,126 °C/kW) debido a la diferencia de los materiales de construcción explicada en el apartado 4.3.1. y 4.3.2.

Además, si nos fijamos en calor medio resultante estimado en el interior de la sala, Φ_h; este tiene un valor alto en el aula 10.15 debido a la calefacción central del edificio (39,5

kW). Para la LS.4, al estar regulada de forma automática y debido a su localización, este valor es mucho menor 7,34 kW.

El *p*-valor ($Pr(<|t|)$) de la tabla 4) de todos los parámetros, se encuentran por debajo del 0,05; por lo tanto son valores fiables. Además, la derivada de la función objetivo respecto a cada parámetro ($dF/dPar$) es prácticamente 0 y la función derivada con respecto a cada parámetro ($dPen/dPar$) no es significativa. Es decir, la solución es óptima y los valores están entre los límites establecidos.

Aula	Param.	T_{i0}	C_i	e_{11}	p_{11}	Φ_h
10.15	C_i	0,08				
	e_{11}	0,16	0,04			
	p_{11}	-0,15	-0,04	-0,54		
	Φ_h	0,11	0,55	0,01	0,02	
	R_{ic}	0,00	-0,16	0,02	-0,05	-0,38
LS.4	C_i	-0,23				
	e_{11}	0,16	-0,03			
	p_{11}	-0,26	0,18	-0,53		
	Φ_h	0,06	-0,27	0,05	-0,02	
	R_{ic}	-0,18	0,62	-0,08	0,14	-0,90

Tabla 4: Matriz de autocorrelación del modelo térmico. Fuente propia

La matriz de autocorrelación mostrada en la tabla 4 determina que no hay ningún tipo de correlación entre los diversos parámetros estimados (todos los valores $\neq 1$). Sin embargo, para el aula LS.4, la correlación entre la resistencia térmica y el calor aportado roza el límite (-0,90), es decir, que hay cierta dependencia entre estos parámetros.

Finalmente, observando los resultados de los residuos, obtenidos mediante el programa R, vemos que estos no tienen correlación (figura 13, izq) y que se encuentran dentro de las bandas del 95% de confianza (figura 13, derech). Como consecuencia se puede afirmar que los residuos que se obtienen se deben sobretodo a ruido blanco.

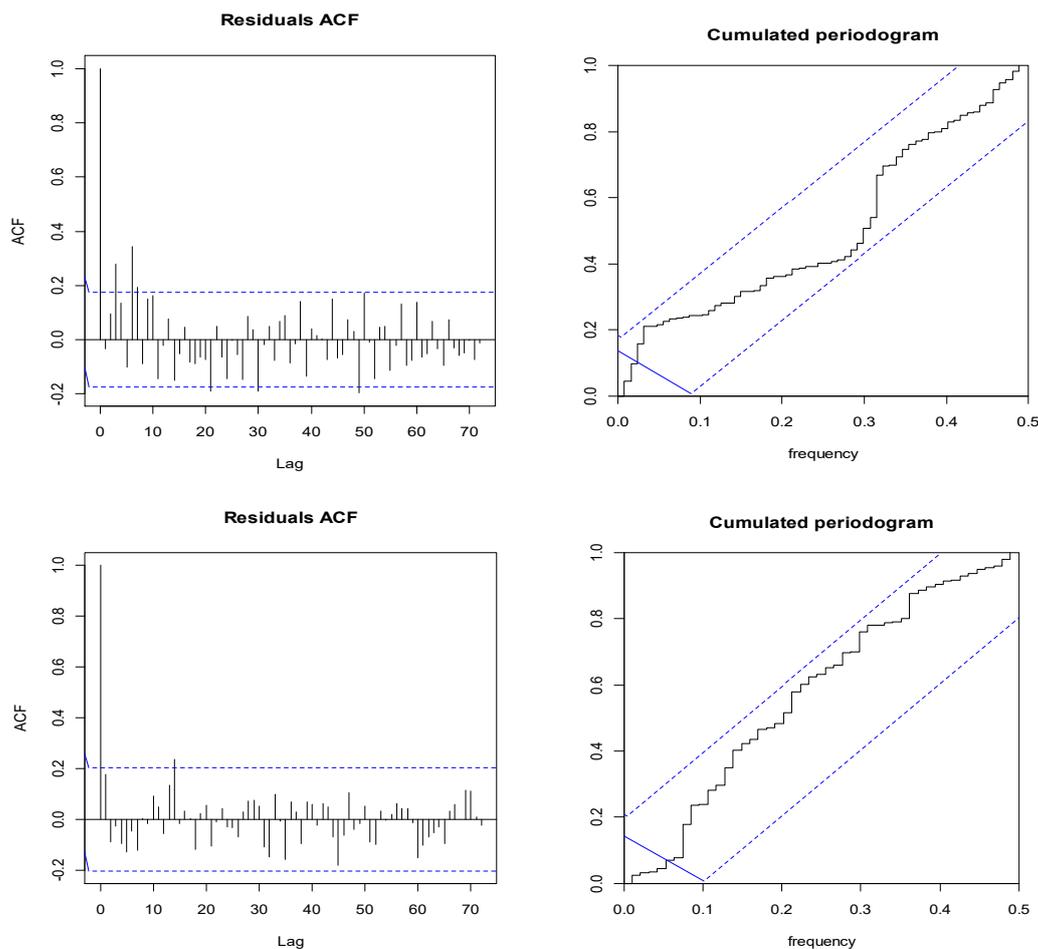


Figura 13: Modelo térmico: Autocorrelaciones (sup.izq.) y Periodograma acumulado (sup.derech.) del Aula 10.15. Autocorrelaciones (inf.izq.) y Periodograma acumulado (inf.derech.) del Aula LS.4 Fuente propia

6.3.2. Modelo de CO₂

Partiendo de los valores obtenidos en las monitorizaciones de CO₂ (apartado 6.1.), el valor de los parámetros estimados mediante CTSM-R del modelo de CO₂ se han recogido en la tabla 5:

Aula	Param	Estim	Error Std	Pr(< t)	dF/dPar	dPen/dPar
10.15	$C_{int\ 0}$	470,00	17,45	0,00	-2,77e-05	0,00
	C_e	466,13	39,07	0,00	-1,05e-04	0,00
	Q_{vent}	10,31	1,57	5,58e-10	1,99e-06	0,00
	p_{22}	2,86	5,37e-02	0,00	-6,55e-04	0,00
	e_{22}	-9,82	7,76e01	0,00	8,57e-05	1e-04

LS,4	$C_{int\ 0}$	567,73	7,126	0,00	4,52e-06	1e-04
	C_e	452,22	113,00	8,99e-05	4,71e-08	0,00
	Q_{vent}	5,23	3,63	1,48e-02	-2,49-e07	0,00
	p_{22}	1,83	1,27	0,00	2,79e-07	0,00
	e_{22}	1,98	3,63	3,69e-03	1,87e-07	0,00

Tabla 5: Parámetros estimados del modelo de CO₂. Fuente propia

Analizando los valores de la tabla 5, vemos que los parámetros obtenidos por el modelo son razonables. La concentración del exterior, C_e (466 y 452 ppm), es mucho menor que el valor mínimo de la concentración interior observado (γC_{int} de la figura 10), permitiendo así el intercambio de concentraciones. No obstante, los valores del caudal de ventilación (10,31 y 5,23 m³/h) son menores a los establecidos, aunque es un valor esperado para el aula 10.15 pues la ventilación es natural.

El p -valor ($Pr(<|t|)$ de la tabla 5) de todos los parámetros se encuentra por debajo del 0,05 por lo tanto, son valores que se pueden aceptar. Por otro lado, la derivada de la función objetivo respecto a cada parámetro ($dPen/dPar$) es prácticamente 0 y la derivada con respecto a cada parámetro no es significativa comparada con $dF/dPar$, validando la correcta y optima estimación estadística de ambos modelos.

Aula	Param.	$C_{int\ 0}$	C_e	e_{22}	p_{22t}
10.15	C_e	0,03			
	e_{22}	-0,07	-0,18		
	p_{22}	0,00	-0,07	-0,61	
	Q_{vent}	0,05	0,46	-0,02	0,45
LS,4	C_e	-0,05			
	e_{22}	0,02	-0,10		
	p_{22}	-0,04	0,13	-0,77	
	Q_{vent}	-0,04	0,94	0,10	0,14

Tabla 6: Matriz de autocorrelación del modelo de CO₂. Fuente propia

Finalmente, la matriz de autocorrelación (tabla 6) muestra que no hay ningún tipo de correlación entre los parámetros estimados para el aula 10.15 (todos los valores $\neq 1$). Para la LS.4 se observa que hay dependencia entre el caudal de ventilación y la concentración exterior (0,94). Este valor es coherente pues el aire impulsado en la sala proviene del exterior.

Se ha determinado que los residuos son causados por ruido blanco, pues la mayoría de las autocorrelaciones (figura 14, izq.) tienden a un valor nulo. Por otro, los valores del periodograma acumulado están dentro de las bandas de confianza del 95% (figura 14, derech.). No obstante, en la parte superior derecha de la figura 14, se observa una cierta dispersión para el aula 10.15, invalidando en modelo.

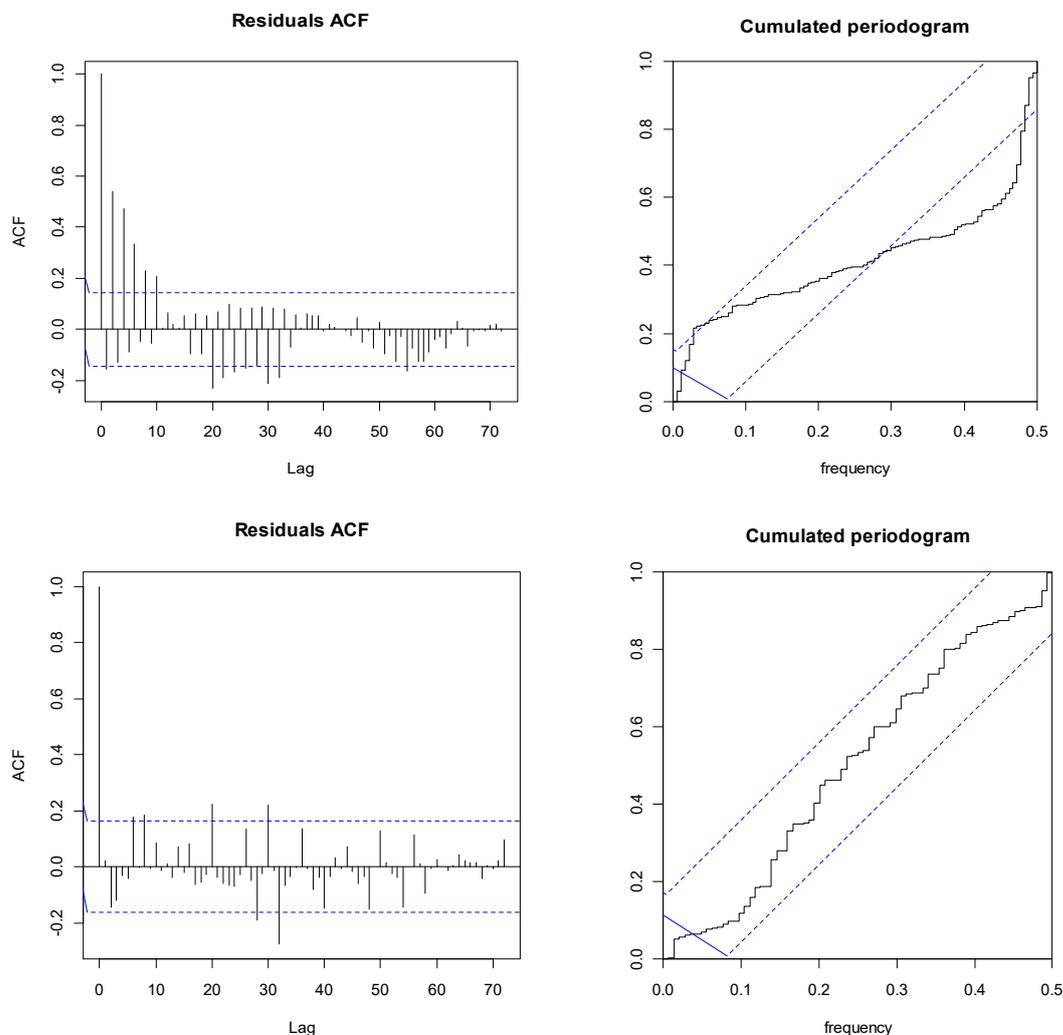


Figura 14: Modelo CO₂: Autocorrelaciones (sup.izq.) y Periodograma acumulado (sup.derech.) del Aula 10.15 y Autocorrelaciones (inf.izq.) y Periodograma acumulado (inf.derech.) del Aula LS.4).

Fuente propia

6.4. Validación de los Modelos

Tras comprobar la idoneidad estadística de los modelos (apartado 6.2.), se procede a la validación de los mismos. Para tal propósito se han comparado los valores obtenidos de las respuestas de ambos modelos, T_i y C_{int} , (calculados a partir de las monitorizaciones del 19 y 21 de Noviembre, conocidos como **OLD data**) con las medidas observadas (yT_i , yC_{int}). Ambos valores se presentan, según el aula, en las figura 15 y 14.

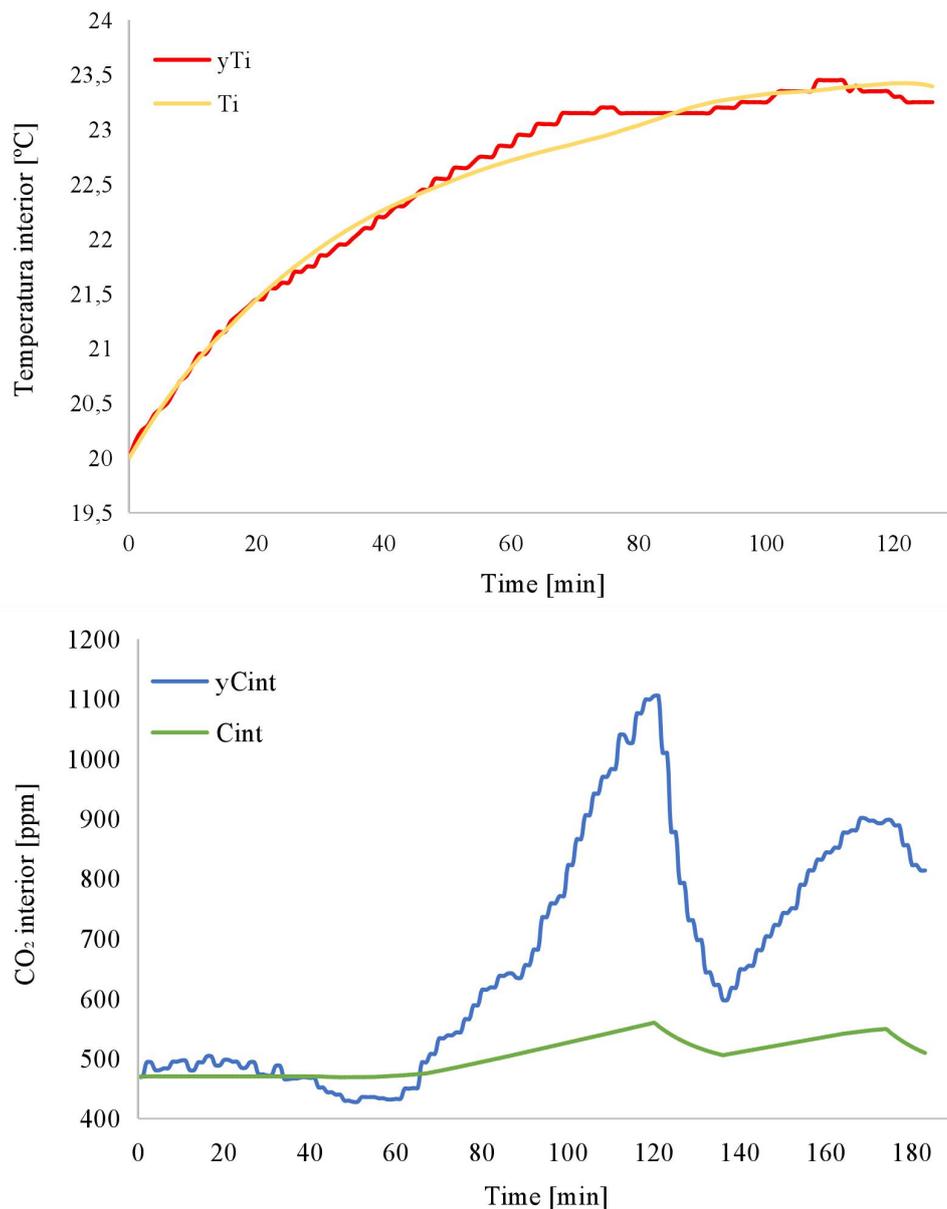


Figura 15: Comparativa entre OLD data y los modelos (Aula 10.15). Fuente propia

Para el aula 10.15 (figura 15) vemos que en el modelo térmico el cálculo de la temperatura interior (T_i) sigue claramente la tendencia observada durante la monitorización de la sala (yT_i), apenas se observa error entre la temperatura calculada y la medida. No obstante, para el modelo de CO_2 , aunque la concentración calculada (C_{int}) sigue la tendencia de la real (yC_{int}), existe un decalaje cuando la concentración sobrepasa las 550 ppm, es decir, el modelo subestima los picos. Este error se debe al haber establecido un valor constante para el caudal de ventilación cuando las ventanas estaban abiertas (ventilación natural) y suponer un valor nulo cuando estas se encontraban cerradas.

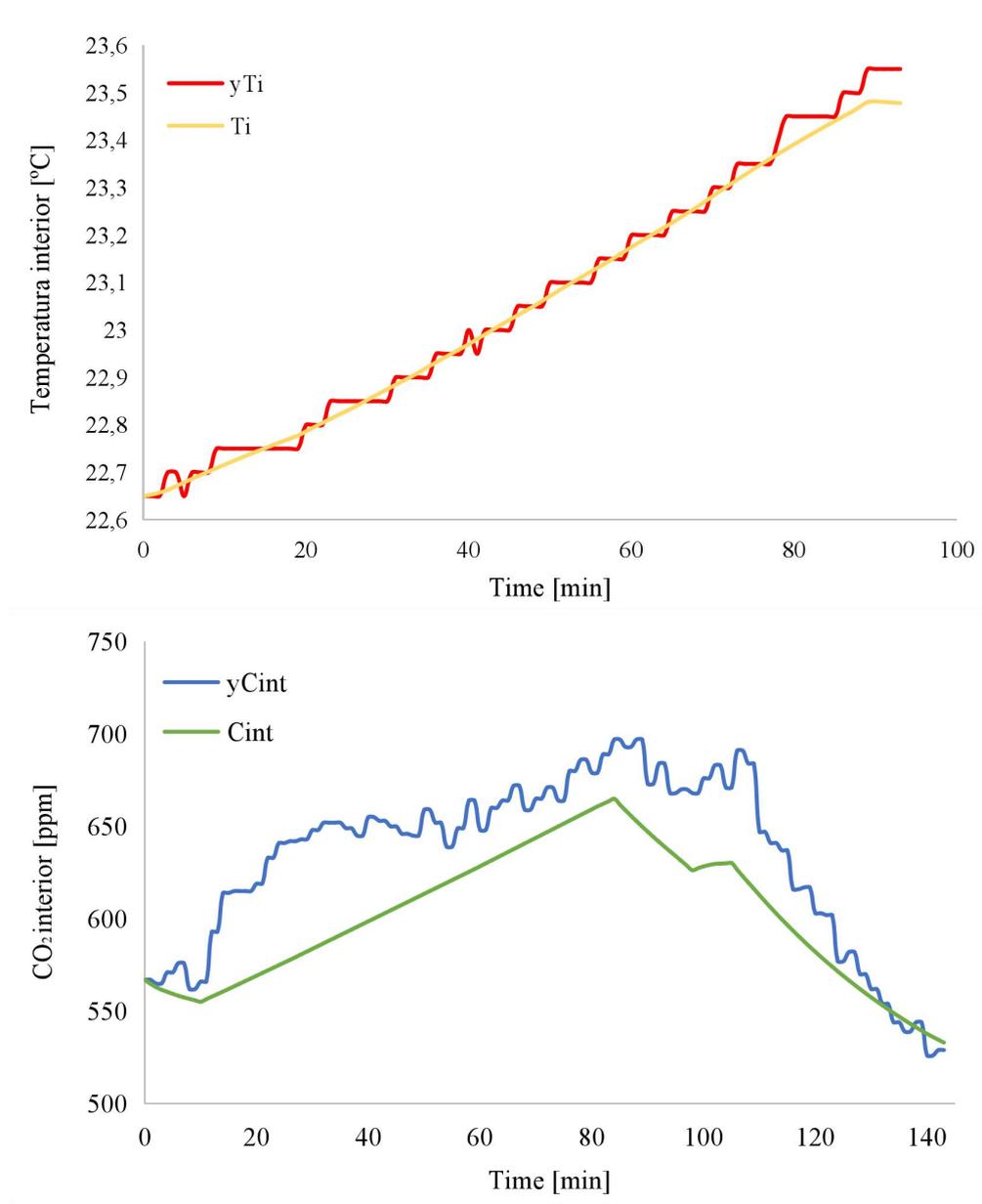


Figura 16: Comparativa entre OLD data y los modelos (Aula LS.4). Fuente propia

En el caso de la sala LS.4 (figura 16) observamos una respuesta térmica (T_i) idéntica a la observada (yT_i) durante toda la monitorización de las sala, aunque el la respuesta del modelo resulta es más suave al valor observado. Para el modelo de CO₂ se observa la misma tendencia entre las medidas realizadas (yC_{int}) y la calculadas con el modelo (C_{in}). No obstante, también tiene cierto decalaje en todo el periodo, aunque mucho menor que en la otra aula (10.15).

Finalmente, para determinar si el modelo puede extrapolarse a otras situaciones ambientales (otros valores de monitorización) se ha realizado el mismo proceso con los valores conocidos de la **NEW data** (anexo C). Estos corresponden al 1 de diciembre (10-12:30 h) para la 10.15 y al 30 de noviembre (12:30-14 h) para la LS.4.

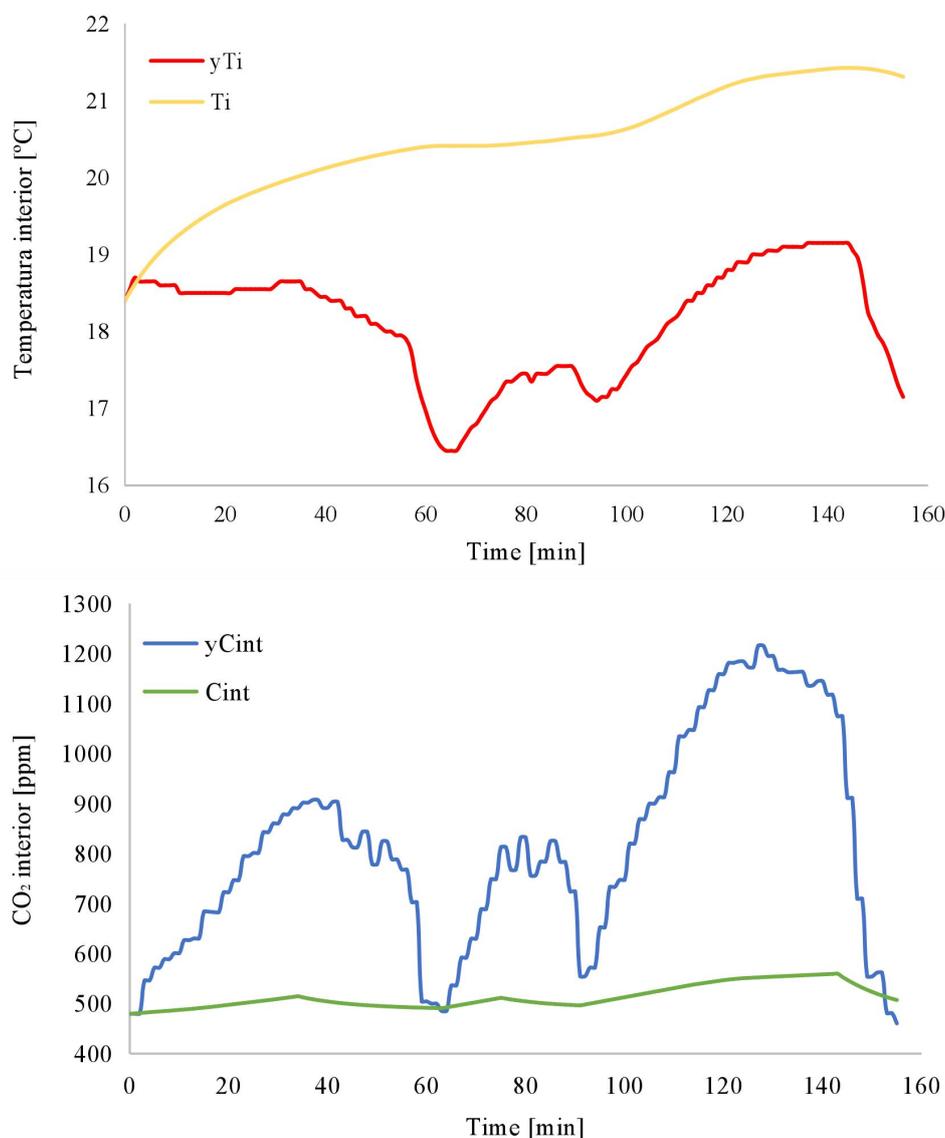


Figura 17: Comparativa entre NEW data y los modelos (Aula 10.15). Fuente propia

Analizando la comparativa de los modelos con los nuevos datos para el aula 10.15 (figura 17) observamos que, en el caso del modelo térmico, el valor calculado de la temperatura interior (T_i) es mucho mayor que el observado (yT_i). Además, la tendencia es totalmente distinta entre estos. Este error se puede deber a que en ese día (*NEW data*) la sala permaneció abierta la gran mayoría del intervalo ($T_i \leq 19^\circ\text{C}$) y, por lo tanto, el calor medio resultante estimado del modelo (Φ_h) no se puede utilizar puesto que las condiciones ambientales no son las mismas.

En el caso del modelo de CO_2 de la misma aula se observa la misma respuesta que con los valores anteriores: el valor calculado (C_{int}) sigue la tendencia de la respuesta (yC_{int}) pero con un gran decalaje.

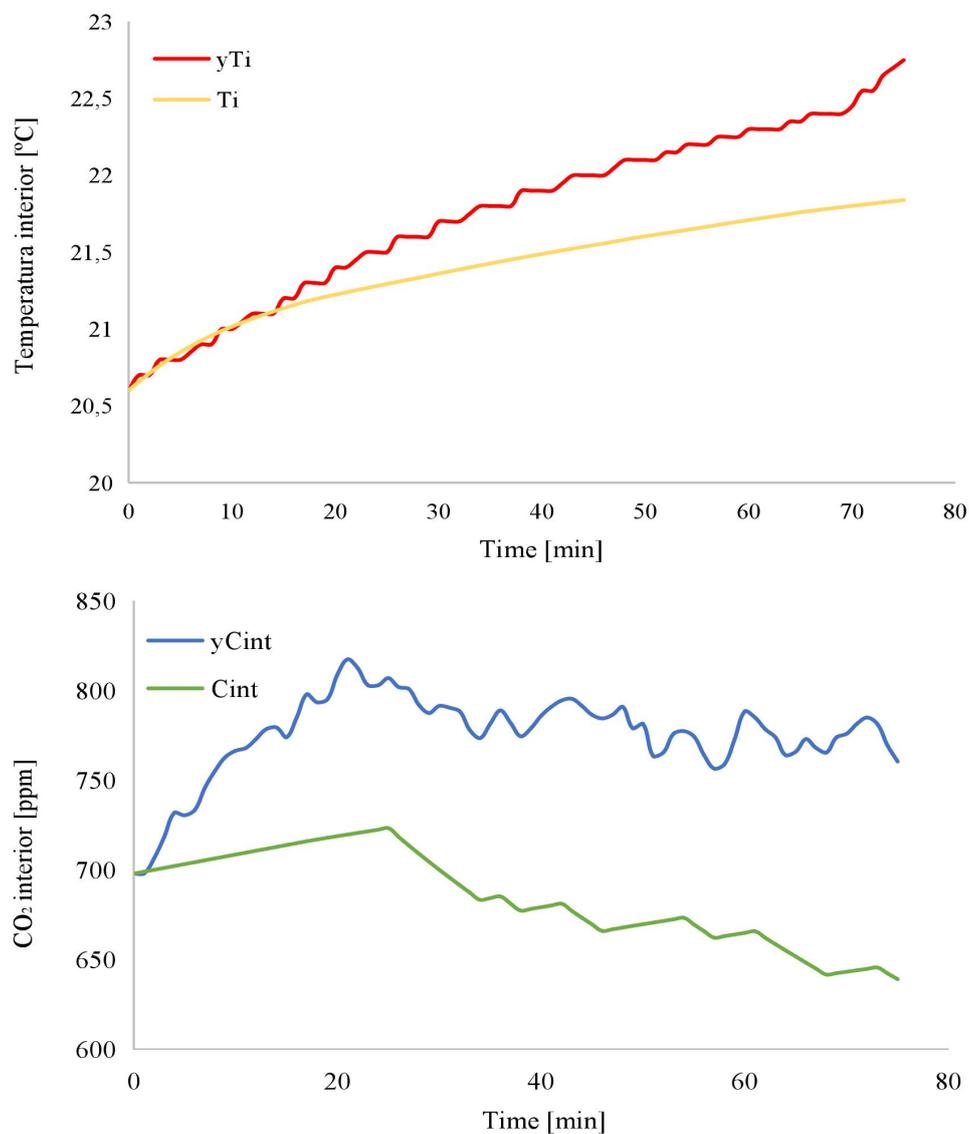


Figura 18: Comparativa entre NEW data y los modelos (Aula LS.4). Fuente propia

En lo que respecta al aula LS.4 (figura 18) el valor real de la temperatura interior (yT_i) y el de la calculada con el modelo (T_i) siguen la misma trayectoria durante los primeros 15 min. Sin embargo, mientras que a partir de ese instante la temperatura interior real mantiene una tendencia creciente, la temperatura del modelo se va atenuando hasta obtener una diferencia de casi 1 °C menos que la observada.

Para el caso del modelo de CO₂, se ve que el valor obtenido (C_{int}) sigue una tendencia decreciente mientras que la concentración medida (yC_{int}) sube hasta 800 ppm y se mantiene oscilante durante el resto del tiempo. Esta diferencia puede ser causada por que durante ese día (**NEW data**) apenas hubo renovación de aire por parte del sistema del aula LS.4 (ventilación forzada). Mientras que en el caso del día con que se ha realizado el modelo (**OLD data**) hubo más intercambio de aire. Es decir, que los parámetros del caudal de ventilación (Q_{vent}) y concentración de CO₂ exterior (C_e) obtenidos previamente no son extrapolables a otras situaciones.

Finalmente, en la tabla 7, se muestran los errores máximos entre las mediciones realizadas y los valores calculados por cada uno de los modelos, según el aula.

Aula	Modelo	MAX Error (OLD data)	MAX Error (NEW data)
10.15	Térmico [°C]	0,31	4,16
	CO ₂ [ppm]	550,66	663,45
LS4	Térmico [°C]	0,07	0,91
	CO ₂ [ppm]	67,94	140,10

Tabla 7: Errores Máximos entre el modelo y la realidad . Fuente propia

En resumen se puede decir que, con los parámetros estimados; el modelo térmico representa con exactitud la realidad del sistema con errores de menos de 1 °C utilizando los datos de calibración (**OLD data**). Sin embargo, el modelo de CO₂ no es capaz de adecuarse a la realidad. En el aula 10.15, aun manteniendo la tendencia, los picos presentan un error de más de 550 ppm (tabla 7). El aula inferior, LS.4, también se observa una diferencia de 68 ppm (tabla 7).

Sin embargo, al realizar las simulaciones con datos correspondientes a otros días de monitorización (**NEW data**), se concluye que los parámetros estimados con los datos de

calibración no son válidos para otras situaciones. Es decir, que no se pueden extrapolar y solo son válidos para las condiciones climáticas observadas durante el periodo de ***OLD data***. El modelo térmico no es capaz de replicar la respuesta real de las salas, observando una diferencia de más de 4 °C (tabla 7) en la aula 10.15. En el modelo de CO₂ se pueden extraer las mismas conclusiones.

6.5. Modelo por tramos

Como consecuencia de la invalidez de los modelos creados (apartado 6.3.), se ha realizado una segunda modelización, partiendo de los mismos circuitos reducidos, pero dividiendo los inputs por tramos (tal y como se explica en el apartado 5.5.). Es decir, en vez de modelizar todo el espectro temporal, se ha dividido según el tipo de evento asociado que implique un cambio significativo de la temperatura y/o concentración de CO₂ en el interior del aula.

Del mismo modo que en apartado 6.2. se han estimado los nuevos valores de los parámetros correspondientes a cada intervalo con los datos de calibración (**OLD data**). Además, se ha verificado exitosamente el análisis estadístico de los mismos (Anexo D). La duración del proceso de estimación de parámetros para cada uno de los intervalos, no ha superado los 5 segundos. En las tablas 8 y 9 se recogen los distintos intervalos en los que se ha dividido la información de la **OLD data**, así como el evento asociado a cada tramo. Para cada período se muestran los valores de los parámetros estimados. Como era de esperar, vemos que cada evento presenta valores distintos de cada uno de los parámetros.

Modelo Térmico	Intervalo [min]	Evento	C_i [kJ/°C]	R_{ie} [°C/kW]	Φ_h [kW/h]
10.15	0-70	<i>Ventanas y puertas cerradas</i>	1040,40	0,04	49,691
	71-100	<i>Una ventana abierta</i>	726,430	23,264	-8,816
	111-127	<i>Dos ventanas y puerta abierta</i>	863,330	10,772	-26,067
LS4	0-70	<i>Puerta cerrada y Clima OFF</i>	553,56	0,126	7,34

Tabla 8: Parámetros estimados del modelo térmico a tramos. Fuente propia

Analizando la tabla 8, vemos que al abrir las ventanas y/o la puerta del aula 10.15 (ventilación natural), la corriente de aire frío que entra en la sala disminuye la temperatura interior y se pierde gran parte del calor medio generado en la sala (Φ_h) pasando de 50 kW sin ventilación a una pérdida de (-)26 kW con la ventilación natural “al máximo”. También podemos ver que la renovación de aire provoca cambios en las propiedades térmicas de la sala: reduciendo su capacidad de absorción de calor (C_i) y aumentando la resistencia de transmisión del mismo (R_{ie}).

Modelo CO ₂	Intervalo [min]	Evento	C _e [ppm]	Q _{vent} [m ³ /h]
10.15	0-39	<i>Ventanas y puerta cerradas, sin ocupación</i>	485,55	53,61
	40-67	<i>Ventana abierta</i>	439,66	17,95
	68-120	<i>Puerta y ventanas cerradas. Extracción de aire</i>	0,00	-1,89
	121-136	<i>Dos ventanas y puerta abierta</i>	473,40	15,48
	137-170	<i>Puerta y ventanas cerradas. Extracción de aire</i>	0,00	-1,45
	171-183	<i>Puerta abierta</i>	0,00	1,17
LS.4	0-10	<i>Clase previa con clima ON</i>	566,90	208,87
	11-30	<i>Clima OFF y extracción de aire</i>	0,00	-0,98
	31-60	<i>Clima ON</i>	648,00	135,25
	61-80	<i>Clima OFF y extracción de aire</i>	0,00	-0,16
	81-105	<i>Clima ON</i>	675,96	71,34
	106-143	<i>Puerta abierta</i>	421,16	6,18

Tabla 9: Parámetros estimados del modelo CO₂ a tramos. Fuente propia

Para el modelo de CO₂ se observan también diferencias entre los eventos. Al abrir las ventanas de la 10.15, el caudal de ventilación (Q_{vent}) aumenta y el aire interior se mezcla con el exterior que se encuentra entre 440-485 ppm (C_e). Sin embargo, al permanecer cerradas, se observa que el caudal pasa a ser negativo y las concentraciones exteriores nulas. Este efecto (analizando la ec. 7) nos indica que el aire del interior está siendo extraído a través de rejillas de extracción o mediante algún tipo de infiltración, un proceso que no se había contemplado en el modelo original. El aula LS.4 sigue el mismo patrón, aunque sus caudales son mucho mayores gracias a su sistema de ventilación forzada (el aula LS.4 responde más rápido).

A continuación, se muestran varias gráficas donde se presenta la comparativa entre lo observado y lo calculado con los nuevos parámetros por tramos. También se incluye, en cada una, la respuesta calculada por el modelo simple para observar la mejora del modelo por tramos.

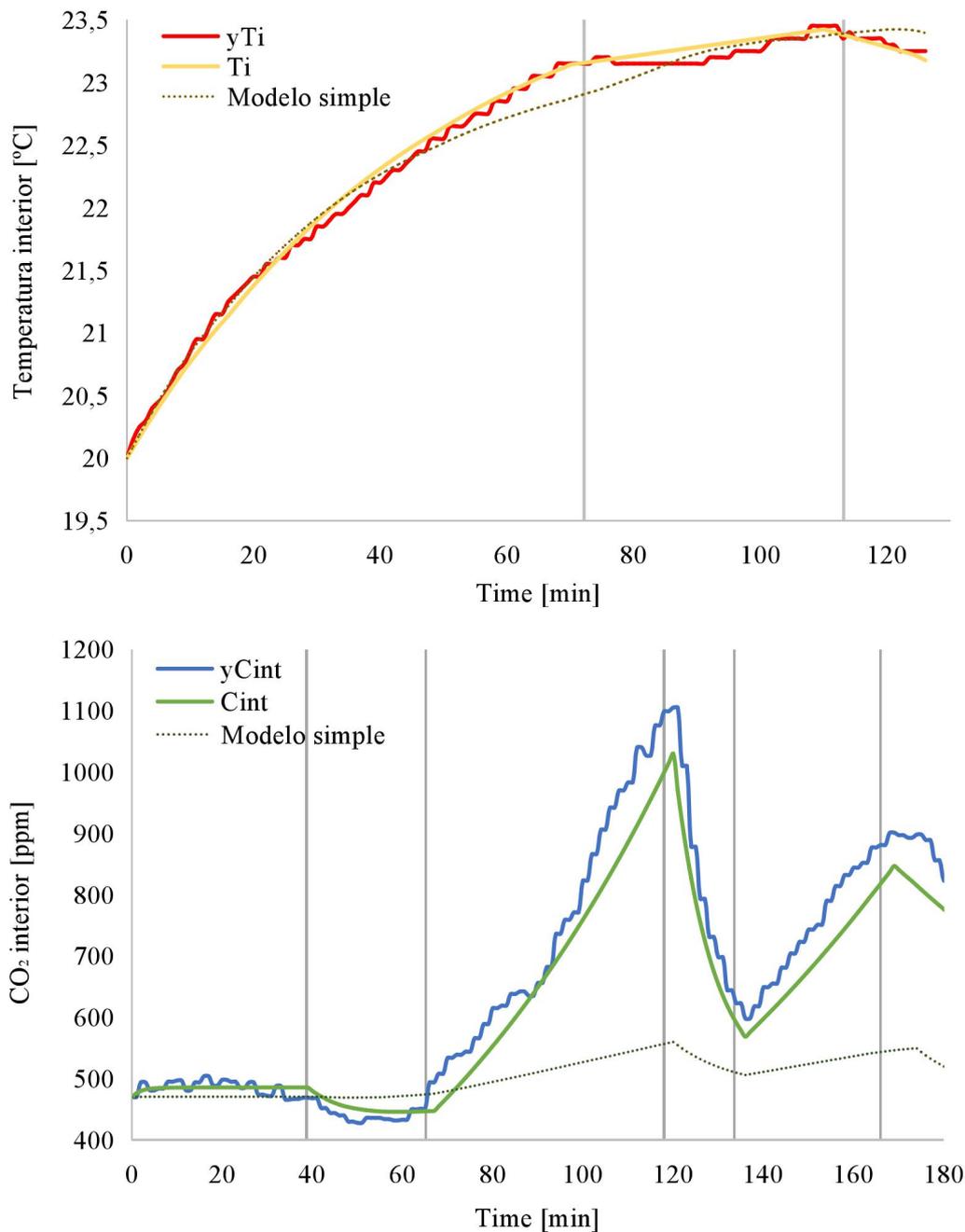


Figura 19: Comparativa entre OLD data y los modelos a tramos (Aula 10.15). Fuente propia

Para el aula 10.15 (figura 19), observamos que en el model térmico apenas se observan deficiencias entre la temperatura interior calculada (T_i) y la real (yT_i). Además, el nuevo modelo a tramos, aproxima mejor la respuesta real que el modelo simple, reduciendo el

error entre lo calculado y lo observado. En lo referente a la concentración interior de CO_2 , se puede observar que en la modificación del modelo simple al de tramos (C_{int}), supone una clara mejora en lo que respecta a los valores obtenidos de la monitorización (yC_{int}).

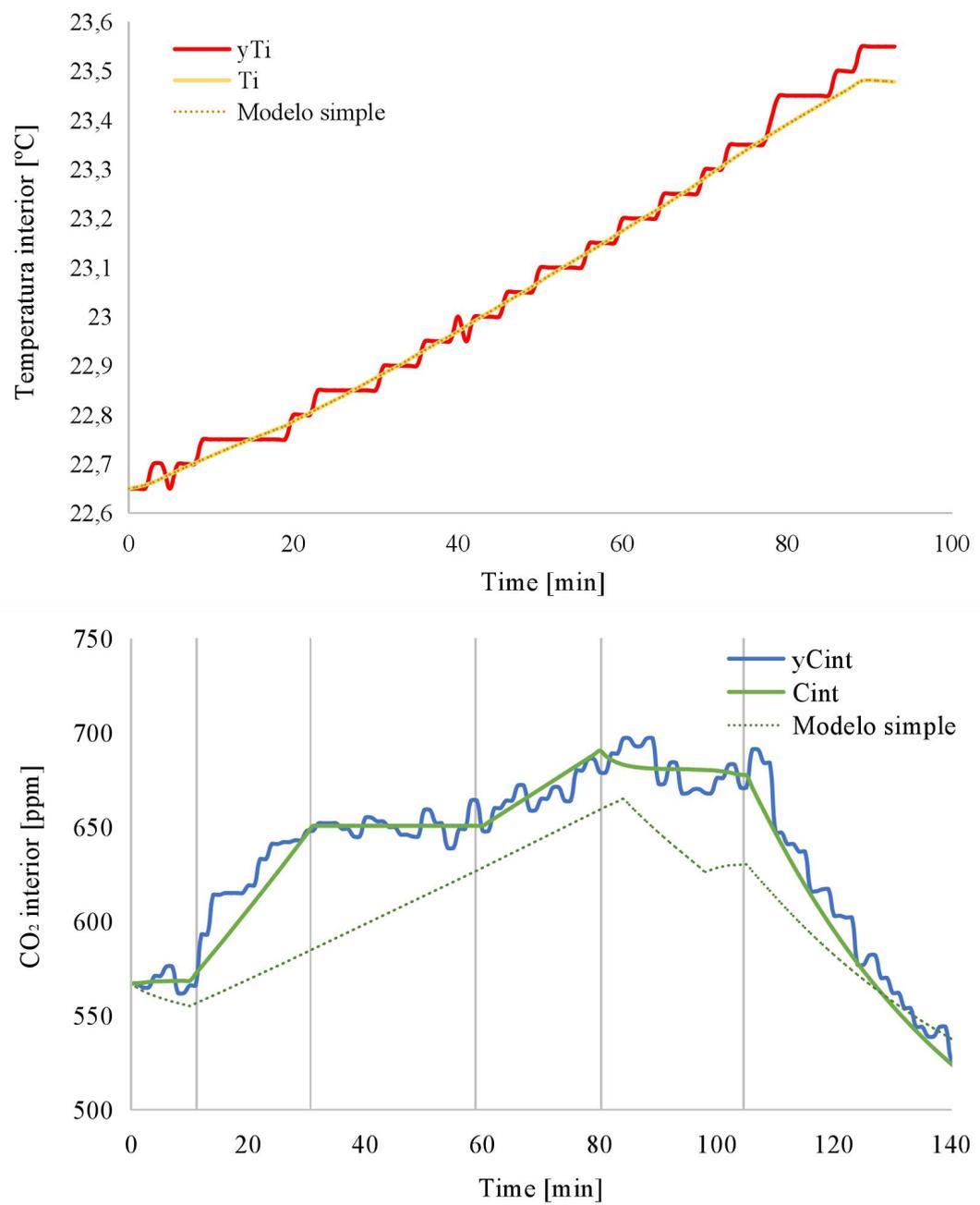


Figura 20: Comparativa entre OLD data y los modelos a tramos (Aula LS.4). Fuente propia.

En el caso del aula LS.4 (figura 20), se ve el mismo tipo de resultados que con el aula anterior. Los valores de temperatura calculados con el modelo por tramos (T_i) y con el modelo simple son iguales, pues no hay ningún evento que divida el periodo de

monitorización, y estos representan claramente la dinámica observada. En el caso del modelo de CO₂, la tendencia de los valores simulados (C_{int}) está en clara sintonía con los valores de la medición (yC_{int}).

En resumen, el modelo a tramos es más acertado a la hora de representar la dinámica térmica y de CO₂ observada en las aulas durante los periodos del 19 y 26 de Noviembre (**OLD data**). Las tendencias son más exactas en ambos modelos y los errores en los picos del modelo de CO₂ se han reducido considerablemente, haciendo visible que la extracción del aire es un evento de gran peso en la dinámica del aire.

Finalmente, con el fin de determinar si los nuevos parámetros son válidos para cualquier grupo de datos (*inputs*) asociados a alguno de los eventos establecidos por los modelos a tramos, se han validado con los nuevos datos asociados al periodo de monitorización conocido como **NEW data**. Los eventos observados y los parámetros utilizados (para cada intervalo de tiempo) se agrupan en la tabla 10.

Aula	Intervalo [min]	Evento	Modelo Térmico			Modelo CO ₂	
			C _i [kJ/°C]	R _{ie} [°C/kW]	Φ _h [kW/h]	C _e [ppm]	Q _{vent} [m ³ /h]
10.15	0-35	<i>Puerta cerrada, una ventana abierta. Extracción de aire</i>	726,430	23,264	-8,816	0,00	-1,89
	35-64	<i>Puerta abierta</i>	863,330	10,772	-26,067	0,00	1,17
	65-81	<i>Puerta y ventanas cerradas. Extracción de aire</i>	1040,40	0,04	49,691	0,00	-1,89
	82-92	<i>Dos ventanas y puerta abierta</i>	863,330	10,772	-26,067	473,40	15,48
	93-140	<i>Puerta cerrada, una ventana abierta. Extracción de aire</i>	726,430	23,264	-8,816	0,00	-1,89
	141-155	<i>Dos ventanas y puerta abierta</i>	863,330	10,772	-26,067	473,40	15,48
LS.4	0-25	<i>Clima OFF y extracción de aire</i>	553,56	0,126	7,34	0,00	-0,98
	26-78	<i>Puerta abierta</i>	553,56	0,126	7,34	648,00	6,18

Tabla 10: Parámetros para NEW data de los modelo a tramos. Fuente propia

Una vez establecidos los eventos y asociarles los parámetros correspondientes a los nuevos datos, se procede a la validación de los modelos a tramos. Las comparativas se representan en las figuras 19 y 20.

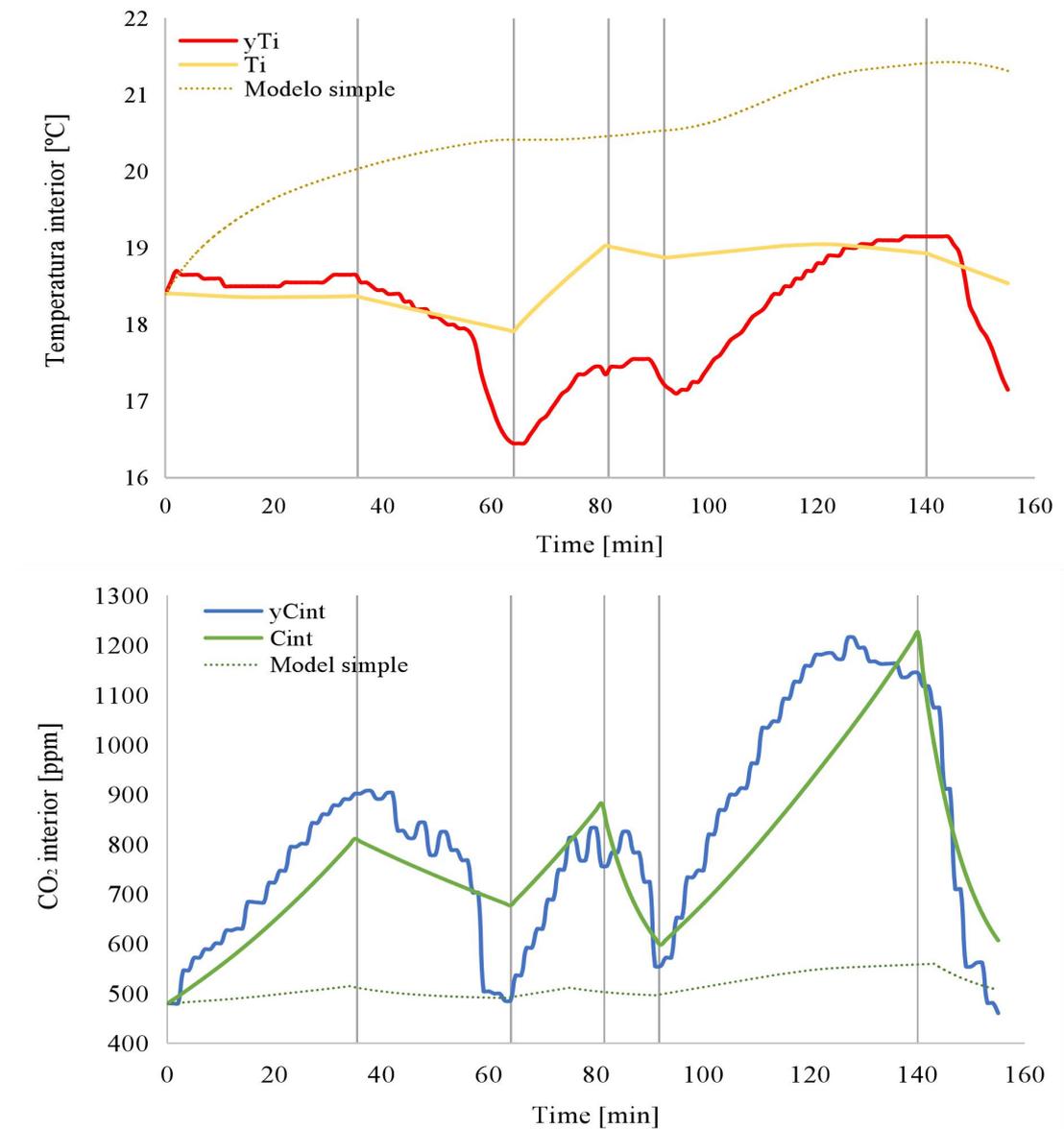


Figura 21: Comparativa entre NEW data y los modelos a tramos (Aula 10.15). Fuente propia

En lo que respecta al aula 10.15 (figura 21), se ve que el modelo térmico a tramos (T_i) presenta menos error que el modelo simple, además de que sigue mejor la evolución térmica real (T_i). No obstante, si nos fijamos en el periodo entre el minuto 60 y 130, vemos que el valor simulado (yT_i) crece hasta mantenerse a los 19 °C mientras que la temperatura real presentan un valle de más de 2 °C. Además, en el tramo final, el valor real cae bruscamente, mientras que el simulado no.

Para el modelo de CO₂, también se observa una clara mejora con el modelo a tramos. Los valores de concentración de CO₂ interior calculados (yC_{int}) siguen claramente de cerca las medidas obtenidas durante la monitorización (C_{int}). Sin embargo presenta dos eventos (35-64 min y 91-140 min) donde ambas líneas difieren en casi 150 ppm.

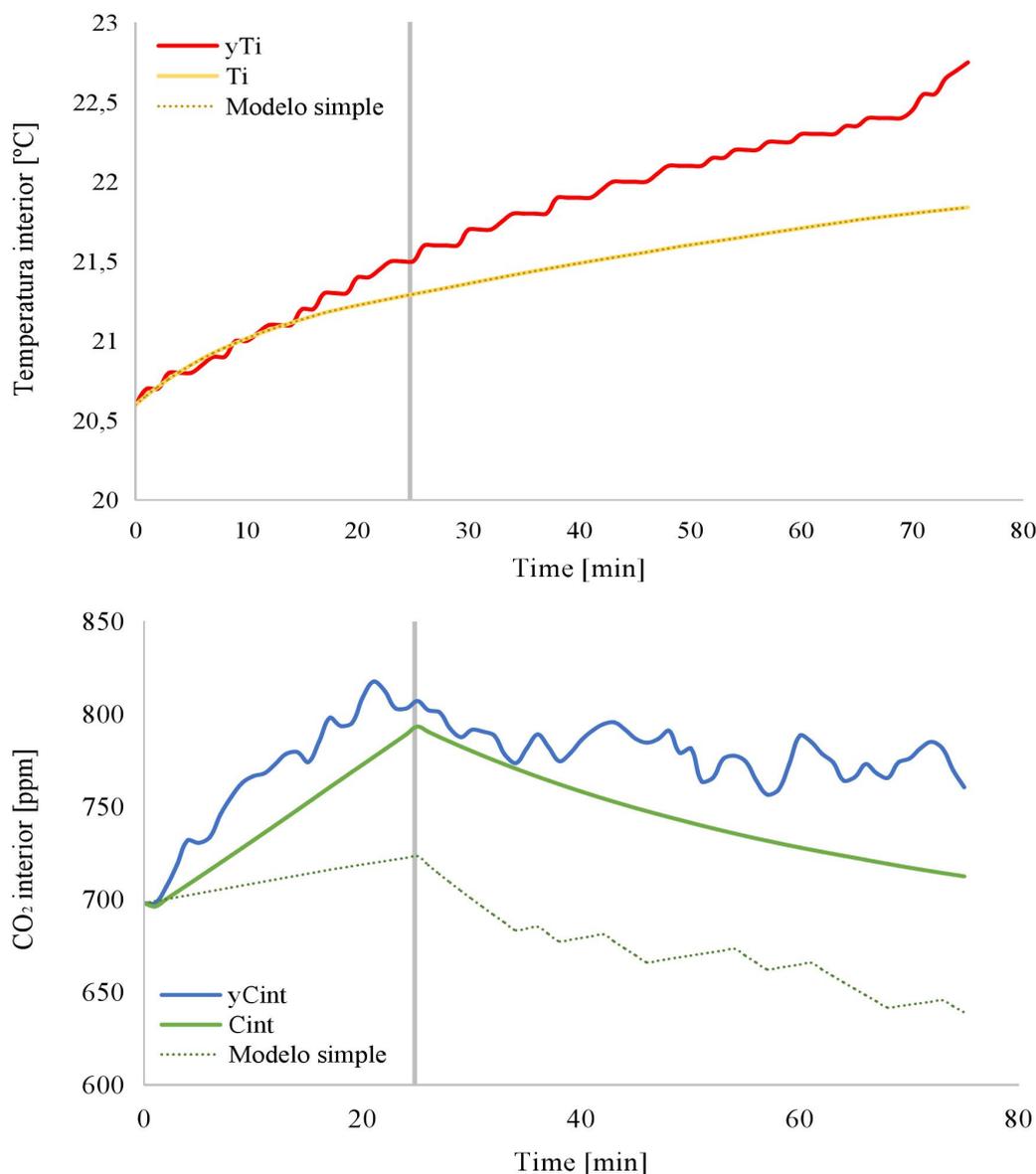


Figura 22: Comparativa entre NEW data y los modelos a tramos (Aula LS.4). Fuente propia.

En el caso del aula LS.4, representado en la figura 22, los valores de temperatura calculados con el modelo por tramos (T_i) tan solo difieren 1 °C con los valores de temperatura interior real (yT_i). Además, las temperaturas calculadas con el modelo a tramos son idénticas a las del modelo simple, ya que solo se ha podido estimar los parámetros de un evento concreto. Por otro lado, para la validación del modelo de CO₂,

se observa que las diferencias de CO₂ simuladas (C_{int}) y las obtenidas (yC_{int}) son mucho menores que las calculadas con el modelo simple. Esta mejoría es clara en el intervalo creciente, de 0 a 25 minutos. Aunque en el resto del periodo la concentración real se mantiene oscilante mientras que la calculada va disminuyendo, el nuevo modelo es más acertado.

Para resumir, se puede determinar que la respuesta de los modelos por tramos (yT_i e yC_{int}) de las figuras 17-20, es más acertada que la obtenida con el modelo simple. Esto se debe a que, como se ha comentado con anterioridad, los parámetros estimados por los modelos no son realmente constantes a lo largo de todo el periodo lectivo, sino que dependen de las condiciones climáticas en cada instante. A raíz de esta afirmación se puede asumir también que, aunque los resultados de los modelos a tramos con los nuevos datos (**NEW data**) son más acertados (figura 21 y 20), los errores observados en la validación de los días correspondientes deben ser causados por las diferencias climáticas entre los días utilizados para la calibración del modelo (**OLD data**) y de los días de validación del modelo (**NEW data**).

Para finalizar, se han recogido los errores máximos de cada modelo en la tabla 11, así como el porcentaje de mejora entre el modelo a tramos y el simple en cuanto al error. Como se ha comentado previamente, se observa una clara reducción del error al usar el modelo a tramos en la mayoría de las respuestas (T_i y C_{int}).

Aula	Modelo	MAX Error (OLD data)			MAX Error (NEW data)		
		Simple	Tramos	Mejora	Simple	Tramos	Mejora
10.15	Térmico [°C]	0,31	0,14	55%	4,16	1,79	57%
	CO ₂ [ppm]	550,66	141,56	74%	663,45	244,09	63%
LS4	Térmico [°C]	0,07	0,07	0%	0,91	0,91	0%
	CO ₂ [ppm]	67,94	31,4	54%	140,1	69,78	51%

Tabla 11: Errores Máximos entre los modelos y la realidad. Fuente propia

En lo que respecta a los medidas de **OLD data**, el modelo térmico y el modelo de CO₂ del aula 10.15 tiene una mejora de 55% y 74% respectivamente, corroborando que la variabilidad de los parámetros según el evento asociado tiene mucho peso en la dinámica

del aula. Para el aula LS.4 también se observa una mejora de 54% para la concentración de CO₂ interior. El modelo térmico de esta aula no presenta mejora pues los parámetros no varían entre el modelo simple y el modelo por tramos, aún así una diferencia de menos de 0,1 °C es más que asumible.

En el caso de los errores obtenidos con los valores de *NEW data*, los modelos de CO₂ a tramos de ambas aulas tienen una mejora del 63 % y 51 % con respecto al error máximo del modelo simple. Si nos fijamos en el modelo térmico del aula 10.15, vemos que la diferencia es significativa, casi 2 °C, pero es un error un 57% más pequeño que el obtenido con el modelo simple (4,16 °C).

7. Planificación, Costes e Impacto

En este apartado se recogen los siguientes puntos del TFM: la planificación de las actividades realizadas, el coste completo y desglosado y el impacto ambiental del proyecto.

7.1. Planificación

La elaboración de este TFM empezó a finales del mes de septiembre de 2021 y finalizó a mediados de enero de 2022, como se puede ver en la figura 23. La planificación del trabajo se ha dividido en 7 fases.

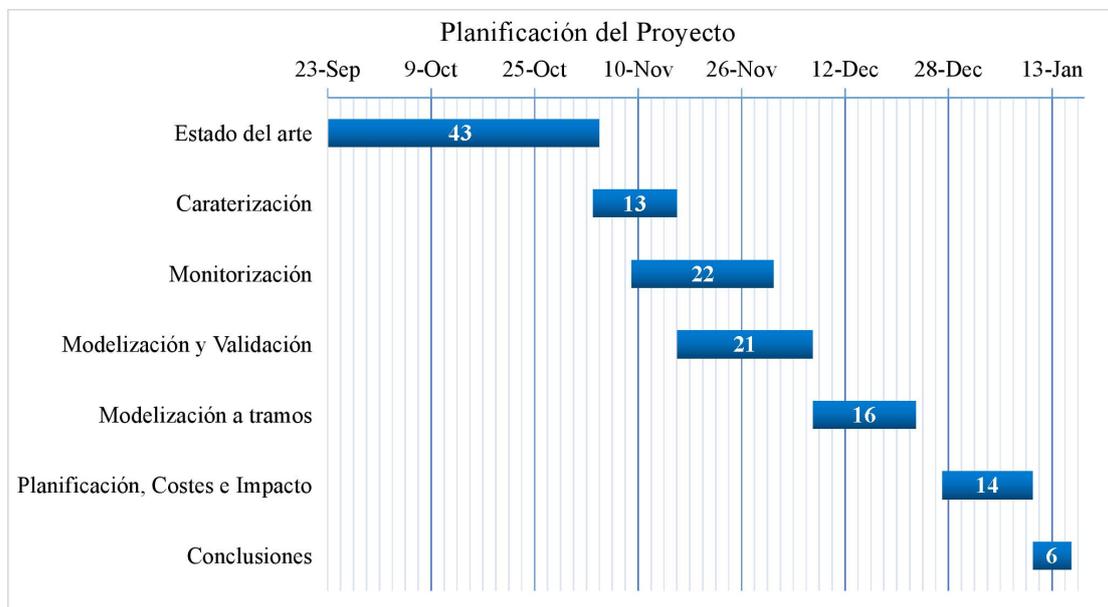


Figura 23: Planificación del proyecto (diagrama de Gantt). Fuente propia

La primera fase es la del Estado del arte, donde se realizó el trabajo de documentación acerca de: el efecto de la pandémia en la universidad y los conceptos de confort térmico y calidad de, aire así como la normativa vigente. Posteriormente se procedió a la caracterización de la aulas de estudio.

Una vez comprados los sensores y haber obtenido la aprobación de la dirección, se inicia la fase de Monitorización para obtener los datos de temperatura y concentración de CO₂ de las distintas salas. De forma simultánea, se precede a la descripción de los modelos *grey box* y se realiza el proceso computacional de modelización y validación de los primeros datos. Una vez analizada la primera modelización, se realizo una optimización

del modelo dividiéndolo a intervalos (Modelización a tramos). Finalmente, las última fases, consistieron en el cálculo de los costes del proyecto junto con un análisis del impacto ambiental.

7.2. Costes

En este punto del informe, se ha realizado un cálculo de los costes del proyecto teniendo en cuenta todos los elementos que intervienen para su materialización. La factura se ha dividido en distintas partes, la primera parte incluye los equipos de la monitorización del proyecto (sensores) y la siguiente parte el coste del personal involucrado. Posteriormente se realiza el cálculo del consumo eléctrico y de la amortización de todos los equipos utilizados.

Para el cálculo de las amortizaciones se ha empleado la siguiente fórmula:

$$\text{Amortización (A)} = \frac{\text{Valor adquisitivo [€]}}{\text{tiempo de vida útil [h]}} \cdot \text{Tiempo de uso [h]} \quad \text{ec. (9)}$$

Dónde:

- Tiempo de vida útil: es el tiempo de funcionamiento total, trabajando en condiciones normales, del objeto estudiado,
- Tiempo de uso: es el tiempo que se ha empleado el objeto durante la realización de este proyecto,
- Valor de adquisición: es el coste de compra del objeto estudiado. En este caso se supondría que el valor residual del objeto, su valor al final de la vida útil, es nulo.

Para calcular la amortización del ordenador se ha estimado una vida útil de 5 años, trabajando 200 días/año y 8h/día (un total de 8000 h). En el caso de los sensores, se ha considerado que tienen una vida útil de 3 años, trabajando 200 días/año y 6h/día (3600 h).

El tiempo de uso del ordenador ocupa el 85 % del investigador en prácticas (550 h) y el tiempo de uso de los sensores se ha aproximado según los días de medidas del periodo de monitorización (20 h). A efectos de contabilizar el precio de la electricidad, se ha considerado un precio de 0,45 €/kWh. Finalmente se ha tenido en cuenta un añadido del 15% destinado a posibles imprevistos del proyecto y el impuesto de valor añadido (IVA).

Concepto		Cantidad	[€/unidad]	Total [€]	
Sensores	Comet	2	386	772,80	
	Elitech	1	26,8	26,80	
Concepto		Horas [h]	[€/h]	Total [€]	
Coste del Personal	Estudiante	325	14	4.550,00	
	Tutor	50	30	1.500,00	
	Ponente	50	30	1.500,00	
Concepto		Potencia [kW]	Uso[h]	[€/kWh]	Total [€]
Consumo eléctrico	Ordenador	220	325	0,12	8,58
	Iluminación	40	370	0,12	1,78
Concepto		Precio [€]	Vida [h]	Uso [h]	Total [€]
Amortización	Ordenador	1.680	8000	325	68,25
	Comet	386	3600	20	4,29
	Elitech	27	3600	20	0,15
Concepto		Porcentaje	Total [€]		
Total	Coste total		8.432,65		
	Coste imprevistos	15%	1.264,90		
	Total antes de impuestos		9.697,55		
	IVA	21%	2.036,48		
	Coste Total del proyecto		11.734,03		

Tabla 12: Costes del proyecto. Fuente propia

Como se observa en la tablas 12, el coste total del proyecto es de 11.734 €, siendo el mayor coste el correspondiente al concepto del personal, que representa más de la mitad del total.

7.3. Impacto ambiental

Cualquier actividad industrial y ciertas actividades de investigación, como la descrita en este TFM, interactúan con el medio ambiente de manera que pueden tener un impacto sobre el mismo.

La Agencia Española de Normalización (*AENOR*) define el medio ambiente como entorno el cual una organización opera, incluyendo el aire, agua, suelo, recursos naturales, flora, fauna, los seres humanos y sus interrelaciones. También se define como aspecto ambiental como elemento de las actividades, productos o servicios de las organizaciones que interactúan o pueden interactuar con el medio ambiente (figura 24). Finalmente, se define el impacto ambiental como cualquier cambio en el medio ambiente (adverso o beneficioso), como consecuencia de los aspectos ambientales de una organización [23].

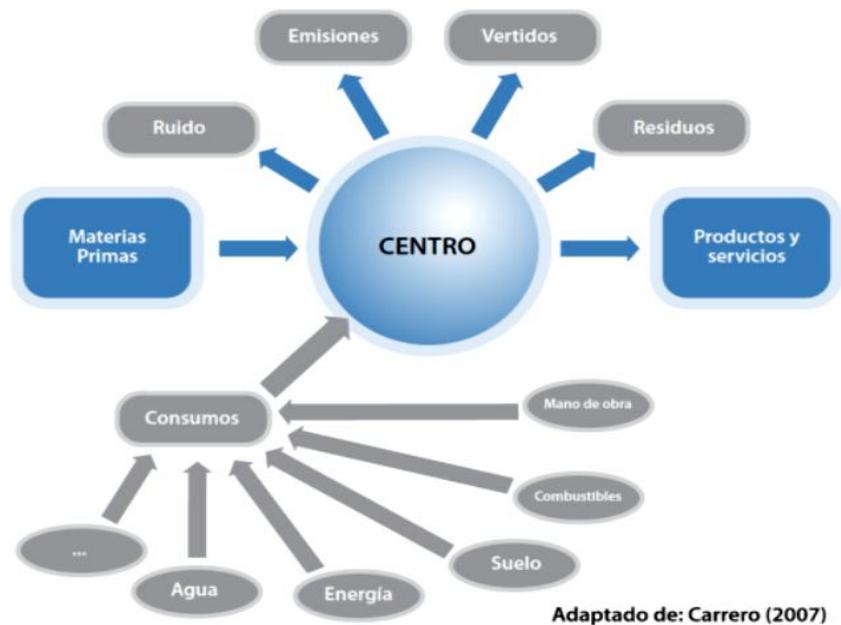


Figura 24: Flujo de aspectos ambientales. Fuente: [21]

En este TFM, el único impacto ambiental está causado por la contaminación producida por la generación de la energía eléctrica consumida por los equipos: el ordenador (modelización y simulación) y el sensor Comet (el sensor Elitech no se ha considerado por su bajo coste). Para el análisis del consumo durante la elaboración de este proyecto se ha tenido en cuenta la procedencia de la energía eléctrica consumida. Para tal propósito se ha utilizado el valor del Mix eléctrico de dióxido de carbono producido en

España durante el año 2021 (0,25 kgCO₂/kWh [22]), un indicador que expresa las emisiones asociadas a la generación de la electricidad que se consume ha permitido calcular el total de emisiones producidas en el proyecto. Para el cálculo se ha usado la energía consumida en el proyecto (tabla 13) y el resultado de las emisiones totales es de 25,7 kgCO₂.

Conclusiones

En este TFM se ha logrado el objetivo principal del proyecto, realizar diversos modelos reducidos, de las aulas 10.15 y LS.4 de la ETSEIB, capaces de simular la dinámica térmica y la concentración de dióxido de carbono en el interior de las salas.

Se ha analizado el protocolo de actuación contra la pandemia llevado a cabo por la UPC a inicios del curso 2021/22 y se han descrito los conceptos de confort térmico y calidad del aire, así como las regulaciones gubernamentales que existen.

Se han recogido datos de temperatura y concentración de CO₂ mediante una monitorización que cubre más de 20 horas lectivas en las aulas 10.15 y LS.4 durante el mes de Noviembre de 2021. Por una parte la temperatura interior y exterior y concentración interior mediante los sensores y por otra parte, la ocupación y el accionamiento de la ventilación de las aulas gracias a los investigadores.

Los resultados de la monitorización, basándose en las regulaciones del RITE y del ASHRAE, se concluye que la sala LS.4 (ventilación forzada) cumple con la normativa nacional de confort térmico y calidad de aire. Sin embargo la aula 10.15 presenta una temperatura inferior a 21 °C durante la gran parte del periodo a causa de la apertura de ventanas (protocolo COVID), incumpliendo con el reglamento. Además, en los casos donde no había ventilación natural (ventanas y puertas cerradas), la concentración de CO₂ superaba el límite estipulado (1000 ppm) durante el 80% del periodo.

Utilizando los modelos de *grey box*, se han construido los modelos de orden reducido para el análisis de la temperatura y la concentración de CO₂ interior usando el lenguaje de programación R y la librería específica CTSM. El modelo térmico supone que la dinámica de la temperatura interna solo depende de las características del aula, de la generación de calor de los ocupantes y la aportación de calor media a la sala. Y, el modelo de CO₂ se basa en principio del balance másico donde solo actúa la generación de dióxido de carbono por parte de los usuarios y la aportación de un caudal exterior.

Se ha realizado una estimación de los parámetros desconocidos (características térmicas de la sala, calor y caudal exterior aportado) de cada uno de los modelos, suponiéndolos

constantes a lo largo del periodo, y los resultados fueron que los valores obtenidos son estadísticamente válidos. A continuación se valida los resultados obtenidos con los parámetros estimados y se determina que ninguno de los modelos describía de forma correcta lo observado en la realidad. En el peor caso 4 °C y 663 ppm de diferencia en el aula 10.15.

Como consecuencia, se modifica el modelo dividiendo el periodo de datos en intervalos de tiempo regidos por eventos que causan modificaciones de la dinámica interna de la sala. De este modo los parámetros desconocidos pasan de ser constantes a ser valores variables. Con este cambio se procede a realizar de nuevo la estimación de los parámetros y la validación de los modelos. El resultado final es que el nuevo modelo a tramos, además de ser estadísticamente válido, representa de forma más exacta la evolución real de la temperatura y de la concentración de CO₂ de las aulas. Concretamente, se observa diferencias de 3 °C y 244 ppm en el aula 10.15 y de 1 °C y 70 ppm en el aula LS.4. Todas las diferencias corresponden a una mejora sobre el modelo simple de más de 57 % en lo referente al modelo térmico y del 60 % del modelo de CO₂.

Se ha realizado un presupuesto que incluye: los costes de los sensores, el personal de investigación, el consumo eléctrico y la amortización de los softwares equipos, que asciende a 11.734 €. Finalmente se presenta un estudio del impacto medio ambiental del proyecto donde se cuantificó 25,7 kg la cantidad de CO₂ producida en este proyecto.

Lineas futuras

Lo más importante a mencionar es el hecho de no haber construido un modelo de la dinámica interior de las aulas válido para cualquier periodo de estudio debido a la variabilidad de los parámetros que dependen de la situación climática.

Por esto se ve importante en un futuros estudios utilizar sensores que permitan obtener el valor de las cargas térmicas y de la ventilación con el fin de utilizarlas como inputs del sistema en vez de estimarlos. Con este cambio sería posible aumentar la complejidad del modelo para estimar nuevos parámetros y simular situaciones atípicas.

Por otra parte, los valores de las muestras obtenidas son muy reducidas y solo abarcan el horario de clase. Una modificación del proceso de monitorización sería abarcar un intervalo continuo desde el inicio al final del periodo lectivo. De este modo se dispondría de más variabilidad de la respuesta frente a las diversas situaciones.

Agradecimientos

Quiero agradecer a mi tutor Lluç Canal por toda la dedicación y el esfuerzo que han depositado para la realización del proyecto. También quiero dar las gracias a Alba Ruiz de Alegría por el trabajo prestado en el proceso de monitorización. Por último, agradezco a los jefes del proyecto COMIT-20 por su apoyo y confianza y sobretodo a Marcel Macarulla en lo referente a la modelización de las aulas.

Bibliografía

- [1] IREC. *Proyecto ComMit-20*. [en línea]. [Consultado el 15 de octubre del 2021]. Disponible en: <<https://www.irec.cat/research/projects/commit20/>>
- [2] Baltà-Salvador, R., Olmedo-Torre, N., Peña, M. et al. *Academic and emotional effects of online learning during the COVID-19 pandemic on engineering students*. *Educ Inf Technol* (2021). Disponible en: <<https://doi.org/10.1007/s10639-021-10593-1>>
- [3] UPC. *Instrucción del rector relativa a la adaptación del Plan de contingencia de la UPC a la propuesta de Plan sectorial de universidades del PROCICAT. Curso 2021-2022*. [en línea]. Disponible en: <https://www.upc.edu/es/sala-de-prensa/pdf/instruccion_rector_plan_contingencia_covid_curso2021_22_es.pdf>
- [4] Godoy Muñoz, Alfonso. *El confort térmico adaptativo. Aplicación en la edificación en España*. [Proyecto Final de Master]. UPCommons (2012). Disponible en: <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/18763/TFM_Alfonso%20Godoy%20Munoz.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [5] P.O. Fanger. (1973). *Assessment of man's thermal comfort in practice*. *British Journal of Industrial Medicine*, 30, 313-324
- [6] Seiscubos. *Modelos estadísticos de confort*. [en línea]. [Consultado el 20 de octubre del 2021]. Disponible en: <<https://www.seiscubos.com/conocimiento/modelos-estadisticos-confort>>
- [7] Richard J. de Dear, Ph.D. (1998). *Developing an Adaptive Model of Thermal Comfort and Preference*. V. 104, Pt. 1.
- [8] BOE-A-2007-15820 (2007). *Real Decreto 1027/2007, de 20 de julio, por el que se aprueba el Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios*. Ministerio de la Presidencia, capítulo IT-1

- [9] UNE-EN ISO 7730 (2006). *Ergonomía del ambiente térmico Determinación analítica e interpretación del bienestar térmico mediante el cálculo de los índices PMV y PPD y los criterios de bienestar térmico local.*
- [10] ANSI/ASHRAE: 55 (2017). *Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy.* Ashrae Standard, 2004, p.30.
- [11] Seiscubos. *Estandar ASHRAE-55.* [en línea]. [Consultado el 25 de octubre del 2021]. Disponible en: <<https://www.seiscubos.com/conocimiento/estandar-ashrae-55>>
- [12] Xavier Guardino Solá (2012). *Capítulo 44 Calidad del aire interior.* Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo (INSHT), 2012
- [13] Instituto Nacional de seguridad e higiene del trabajo. *NTP 289: Síndrome del edificio enfermo: factores de riesgo.* [en línea]. [Consultado el 12 de noviembre del 2021]. Disponible en: <https://www.insst.es/documents/94886/327166/ntp_289.pdf/7299d03d-aba7-4b06-8adb-5d5732fb5eb9>
- [14] ANSI/ASHRAE: 55 (2018). *Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality* Ashrae Standard. ISSN 1041-2336
- [15] Thilker, C. A., Bacher, P., Bergsteinsson, H. G., Junker, R. G., Cali, D., & Madsen, H. (2021). *Non-linear grey-box modelling for heat dynamics of buildings.* *Energy and Buildings*, 252
- [16] Marcel Macarulla, Miquel Casals, Matteo Carnevali, Núria Forcada, Marta Gangolells. *Modelling indoor air carbon dioxide concentration using grey-box models.* *Building and Environment*, Volume 117, 2017, Pages 146-153, ISSN 0360-1323
- [17] Niels Rode Kristensen, Henrik Madsen, Sten Bay Jørgensen. *Parameter estimation in stochastic grey-box models.* *Automatica*. Volume 40, Issue 2, 2004, Pages 225-237, ISSN 0005-1098,
- [18] Peder Bacher, Henrik Madsen. *Identifying suitable models for the heat dynamics*

of buildings, Energy and Buildings. Volume 43, Issue 7, 2011, Pages 1511-1522, ISSN 0378-7788,

- [19] Serra Castilla, R. (Enero 2019-20). *Modelització estocàstica en temps continu. Aplicació a les dinàmiques de calor d'un edifici*. Trabajo de Final de grado. Facultad de Matemáticas y Estadística
- [20] IDAE. *Bienestar térmico en un espacio climatizado*. [en línea]. [Consultado el 20 de noviembre del 2021]. Disponible en:
<<https://www.idae.es/articulos/bienestar-termico-en-un-espacio-climatizado>>
- [21] Normas de elaboración del PGAI. *Elaboración del diagnóstico ambiental inicial*. [en línea]. [Consultado el 11 de enero de 2022]. Disponible en:
<http://www.pgrweb.go.cr/scij/Busqueda/Normativa/Normas/nrm_articulo.aspx?param1=NRA&nValor1=1&nValor2=77829&nValor3=97796&nValor5=7>
- [22] Oficina catalana del Cambio Climático. *Factor de emisión de la energía eléctrica: el mix eléctrico*. [en línea]. [Consultado el 11 de enero de 2022]. Disponible en:
<https://canviclimatic.gencat.cat/es/actua/factors_demissio_associats_a_lenergia/>

Anexo A: DataSheets

- Datalogger U3430



Data Logger con sensores de temperatura, humedad y CO2 incorporados.

código: U3430



Datalogger is designed to record temperature, humidity and CO2. In case of exceeded set limits alarms are indicated by LED, LCD and acoustically by built-in beeper. The recording is performed in a non-volatile electronic memory. The data can be transferred to a PC via USB-C.

Recorder includes **Traceable calibration certificate** with declared metrological traceability of etalons is based on requirements of **EN ISO/IEC 17025 standard**.

Datos técnicos

SENSOR DE TEMPERATURA	
Rango de medición	-20 to +60 °C
Precisión	±0.4 °C
Resolución	0.1 °C
SENSOR DE HUMEDAD	
Rango de medición	0 to 100 % RH
Precisión	± 1.8 % RH
Resolución	0.1% RH
PUNTO DE ROCIO	
Rango de medición	-90 to +60 °C
Precisión	±1.5 °C at ambient temperature T <25 °C and RH >30 %
Resolución	0.1 °C
SENSOR CO2	
Rango de medición	0 to 5000 ppm
Precisión	±(50ppm +3% from reading) at 25°C and 1013hPa
Resolución	1 ppm
DATOS TÉCNICOS GENERALES	
Temperatura de funcionamiento	-20 to +60 °C
Canales	internal sensors for temperature, humidity, CO ₂
Memoria	500,000 values in noncyclic logging mode; 350,000 values in cyclic record mode
Intervalo de grabación	adjustable from 1 s to 24 h
Actualización pantalla y alarma	adjustable 1 s, 10 s, 1 min
Modo grabación	noncyclic - data logging stops after filling the memory cyclic - after filling memory oldest data is overwritten by new
Reloj en tiempo real	year, leap year, month, day, hour, minute, second
Alimentación	battery SONY Lilon 5200mAh
Clase de protección	IP20
Dimensiones	61 x 93 x 53 mm
Peso (incluyendo baterías)	approx. 250 g
Garantía	3 years

● Elitech RC-5

Certifications	FDA EN12830, CE, RoHS
Recording Options	Multi-Use
Validation Certificate	Hardcopy
Temperature Range	-30°C to 70°C
Software	ElitechLog Win or Mac (latest version)
Temperature Accuracy	±0.5(-20°C/+40°C);±1.0(other range)
Report Generation	Exportable PDF report
Temperature Resolution	0.1°C
Password Protection	Optional on request
Data Storage Capacity	32,000 readings
Connection Interface	USB 2.0, A-Type
Shelf Life/Battery	6 Months/CR2032 button cell
Alarm Configuration	Optional, up to 5 points
Recording Interval	10 min-24 hr adjustable
Reprogrammable	With free Elitech Win or MAC software
Startup Mode	Button
Dimensions	80mmx25mmx12mm(LxWxH)
Stop Mode	Button, software or stop when full
Weight	35g
Protection Class	IP67

Anexo B: Código CTSM-R

- Modelo Térmico

```
## Open CTSM-R package
library(ctsmr)
## List with global parameters used by CTSM-R for the estimation
computations
prm <- list()
prm$threads <- 1
## Read the data into a data.frame (XX will be from 10.15 or LS.4)
dades <- read.csv("input_XX_.csv", sep=";", header=TRUE)
names(dades) <- c("t", "yTi", "Te", "P")
## Create a New object of class ctsm
model <- ctsm$new()
## Add system equations and thereby also states
model$addSystem(dTi ~ ( 1/(Ci*Rie)*(Te-Ti) + 1/Ci*Ph +
1/Ci*P*0.7)*dt + exp(p11)*dw1)
## Set the names of the inputs
model$addInput (Te, P)
## Set the observation equation
model$addObs (yTi ~ Ti)
## Set the variance of the measurement error
model$setVariance(yTi ~ exp(e11))
## Set the initial value (for the optimization) of the states at the
start time point
model$setParameter( Ti = c(init=15 , lb=0 , ub=25) )
## Set the initial value of the parameters for the optimization
model$setParameter( Ci = c(init=452 , lb=0 , ub=900) )
model$setParameter( Rie = c(init=15 , lb=0 , ub=30) )
model$setParameter( Ph = c(init=20 , lb=0 , ub=40) )
model$setParameter( p11 = c(init=1 , lb=-50 , ub=10) )
model$setParameter( e11 = c(init=-1 , lb=-50 , ub=10) )
## Run the parameter optimization
fit <- model$estimate(data=dades, threads=prm$threads)
## See the summary of the estimation
print(summary(fit, extended=TRUE))
## Residuals Plots
tmp <- predict(fit)[[1]]
dades$residuals <- dades$yTi - tmp$output$pred$yTi
dades$yTiHat <- tmp$output$pred$yTi
par(mfrow=c(1, 2))
acf(dades$residuals, lag.max=6*12, main="Residuals ACF")
cpgram(dades$residuals, main="Cumulated periodogram")
```

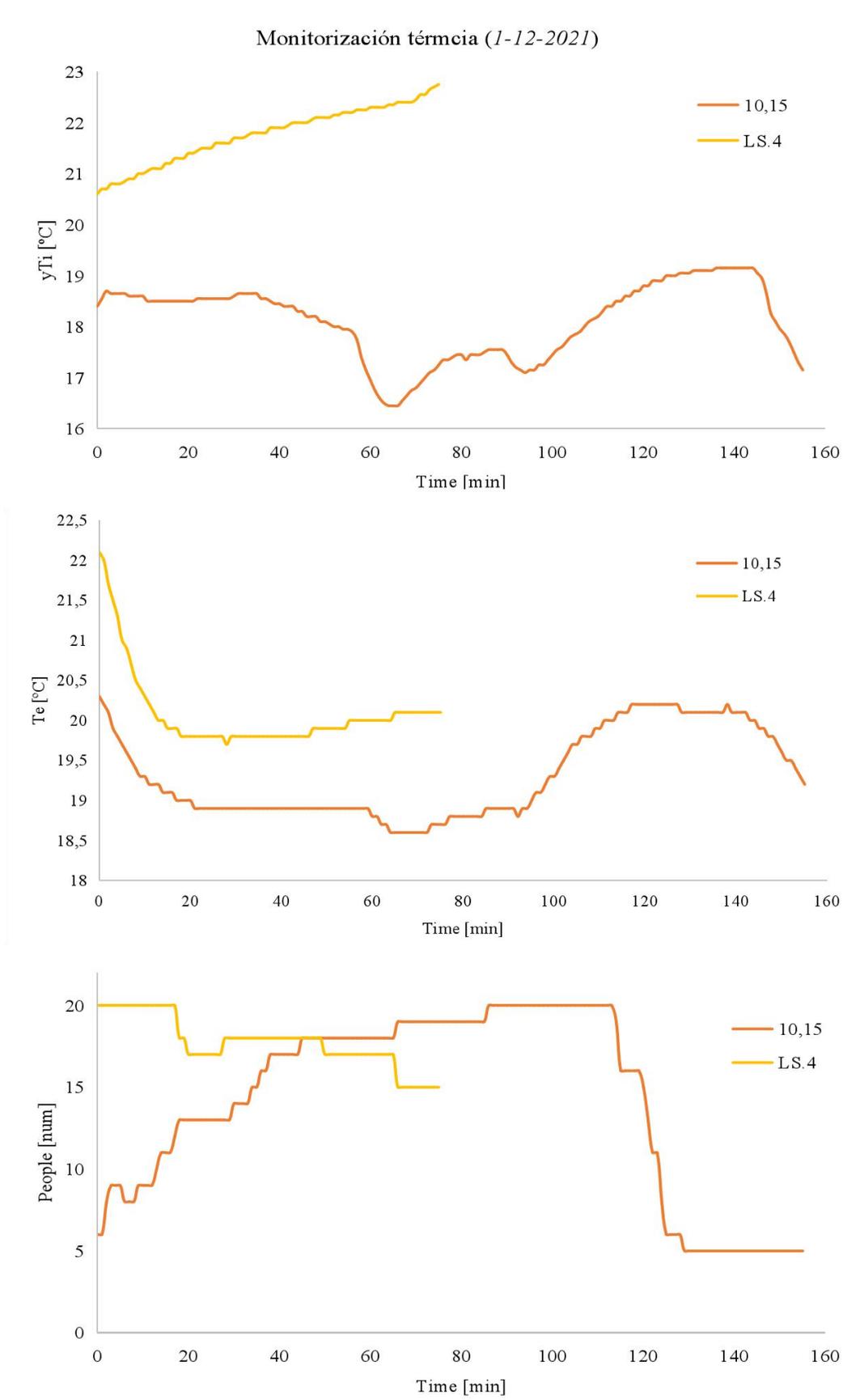
● **Modelo CO₂**

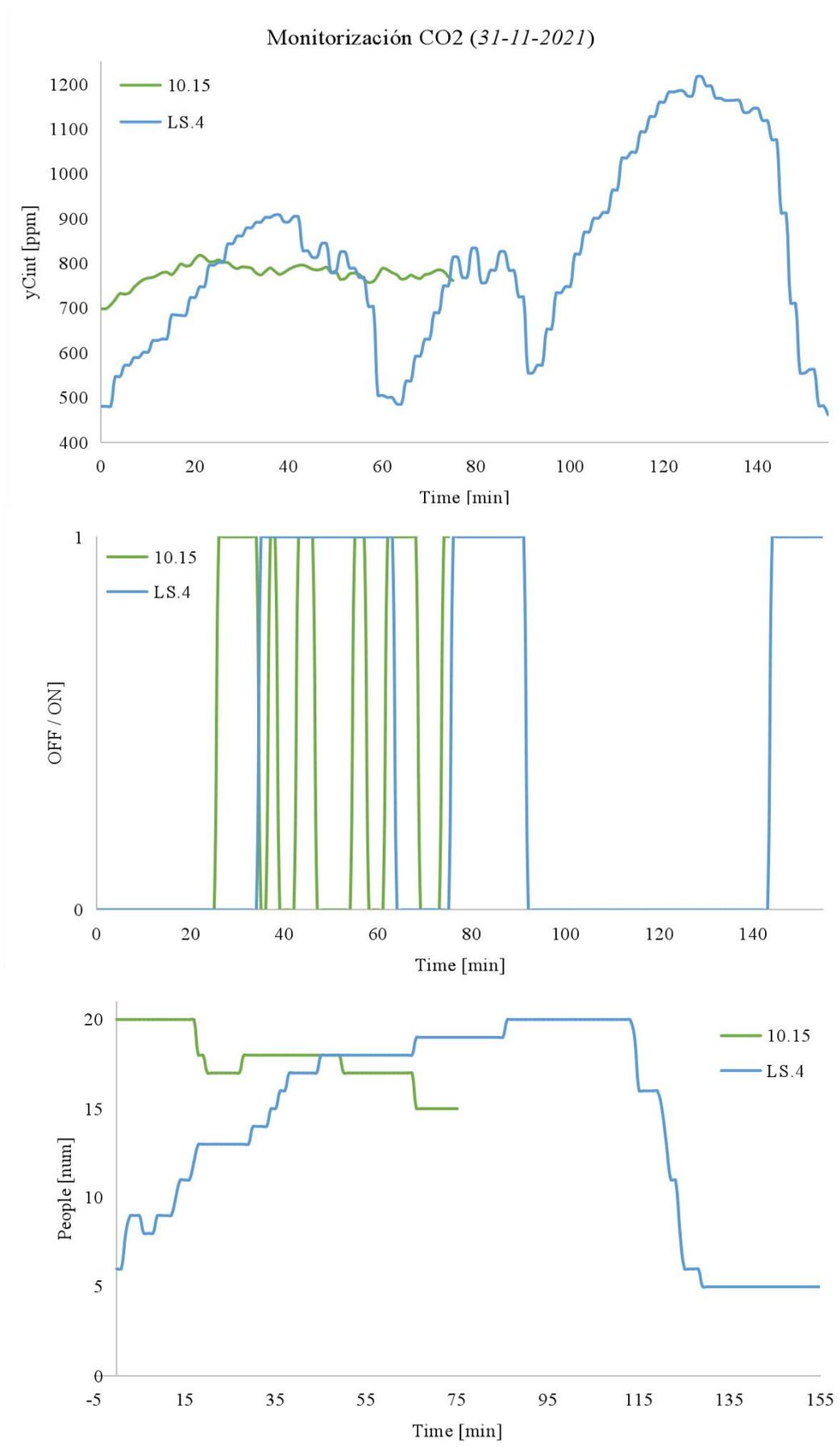
```

## Open CTSM-R package
library(ctsmr)
## List with global parameters used by CTSM-R for the estimation
computations
prm <- list()
prm$threads <- 1
## Read the data into a data.frame (XX will be from 10.15 or LS.4)
dades <- read.csv("input_XX_.csv", sep=";", header=TRUE)
names(dades) <- c("t", "yCint", "P", "f")
## Create a New object of class ctsm
model <- ctsm$new()
## Add system equations and thereby also states
model$addSystem(dCint ~ ( f*Qvent*(Ce-Cint)/140 +
12.748*P/Vr)*dt + exp(p22)*dw1)
## Vr <- 140 (10.15) or 240 (LS.4)
## Set the names of the inputs
model$addInput(P, f)
## Set the observation equation
model$addObs(yCint ~ Cint)
## Set the variance of the measurement error
model$setVariance(yCint ~ exp(e22))
## Set the initial value (for the optimization) of the states at the
start time point
model$setParameter( Cint = c(init=400 , lb=0 , ub=2000) )
## Set the initial value of the parameters for the optimization
model$setParameter( Qvent = c(init=0 , lb=-10000 , ub=10000) )
model$setParameter( G= c(init=0 , lb=-10000 , ub=10000) )
model$setParameter( Ce = c(init=400 , lb=0 , ub=2000) )
model$setParameter( p22 = c(init=1 , lb=-50 , ub=10) )
model$setParameter( e22 = c(init=-1 , lb=-50 , ub=10) )
## Run the parameter optimization
fit <- model$estimate(data=dades, threads=prm$threads)
## See the summary of the estimation
print(summary(fit, extended=TRUE))
## One-step predictions of the state
tmp <- predict(fit)[[1]] ## Residuals
dades$residuals <- dades$yCint - tmp$output$pred$yCint
dades$yCintHat <- tmp$output$pred$yCint
par(mfrow=c(1,2))
acf(dades$residuals, lag.max=6*12, main="Residuals ACF")
cpgram(dades$residuals, main="Cumulated periodogram")

```

Anexo C: Datos de Monitorización (*NEW data*)





Anexo D: Modelo por Tramos: Parámetros

● 10.15 - Modelo Térmico

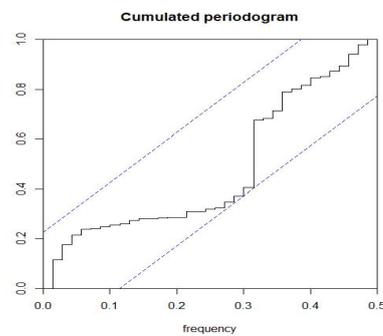
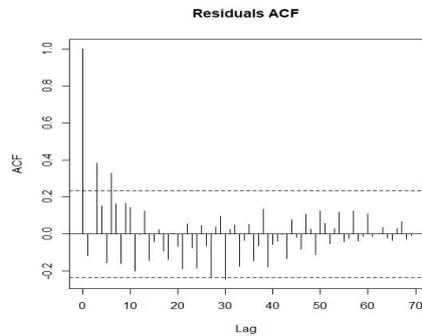
■ 0-70 min

Coefficients:

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)	dF/dPar	dPen/dPar
Ti0	2.0041e+01	2.4831e-02	8.0710e+02	0.0000e+00	6.4652e-04	0.0020
Ci	8.6161e+02	3.9496e+01	2.1815e+01	0.0000e+00	1.2131e-04	0.0526
e11	-7.4854e+00	2.3581e-01	-3.1743e+01	0.0000e+00	5.2662e-05	0.0000
p11	-4.1006e+00	1.8035e-01	-2.2738e+01	0.0000e+00	2.3951e-05	0.0000
Ph	3.9768e+01	9.6750e-01	4.1104e+01	0.0000e+00	5.2892e-04	2.9521
Rie	4.6480e-02	3.9492e-03	1.1769e+01	4.4409e-16	-5.9450e-06	0.0000

Correlation of coefficients:

	Ti0	Ci	e11	p11	Ph
Ci	0.18				
e11	0.17	0.00			
p11	-0.26	-0.10	-0.23		
Ph	-0.02	0.31	-0.01	-0.02	
Rie	0.14	0.10	0.05	-0.01	-0.22



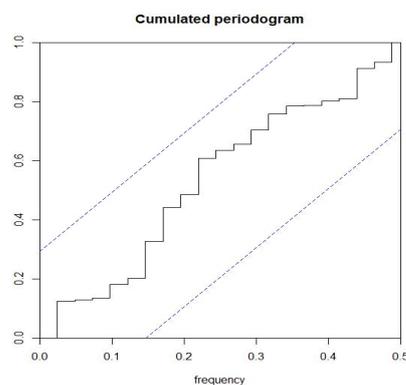
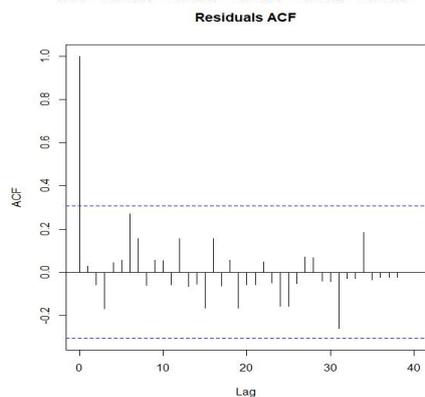
■ 71-110 min

Coefficients:

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)	dF/dPar	dPen/dPar
Ti0	2.3150e+01	2.3860e-02	9.7024e+02	0.0000e+00	1.5669e-04	0.0169
Ci	8.8639e+02	1.1892e+02	7.4538e+00	3.2897e-08	2.6113e-06	0.4308
e11	-1.9973e+01	4.5714e+01	-4.3692e-01	6.6486e-01	-6.8508e-07	0.0001
p11	-3.7982e+00	1.1798e-01	-3.2193e+01	8.8818e-16	2.1892e-07	0.0000
Ph	1.4680e-08	9.8729e-06	1.4869e-03	9.9882e-01	5.1613e-10	0.0000
Rie	1.9950e-01	1.4211e-01	1.4039e+00	1.6925e-01	-1.1594e-05	0.0000

Correlation of coefficients:

	Ti0	Ci	e11	p11	Ph
Ci	0.00				
e11	-0.01	0.09			
p11	0.00	-0.01	0.00		
Ph	0.01	0.04	-0.98	0.00	
Rie	-0.04	0.32	0.14	0.05	-0.09



■ 111-127 min

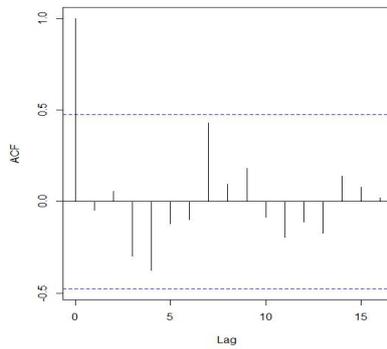
Coefficients:

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)	dF/dPar	dPen/dPar
Ti0	2.3444e+01	1.1022e-02	2.1272e+03	4.5706e-06	-8.8708e-04	0.0242
Ci	8.8884e+02	4.8925e+02	1.8168e+00	9.7799e-02	-8.8367e-06	0.6428
e11	-7.5407e+00	3.4311e-01	-2.1978e+01	7.3715e-06	-2.6676e-07	0.0000
p11	-1.2749e+01	5.2139e+03	-2.4453e-03	9.9809e-01	-5.8257e-08	0.0000
Ph	2.1431e-07	1.6223e-04	1.3210e-03	9.9897e-01	1.5239e-09	0.0000
Rie	6.4215e-02	1.3162e-02	4.8788e+00	9.5189e-04	-1.2479e-05	0.0000

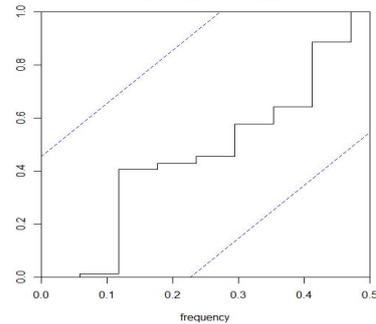
Correlation of coefficients:

	Ti0	Ci	e11	p11	Ph
Ci	0.25				
e11	-0.06	-0.30			
p11	-0.25	-0.98	0.30		
Ph	-0.07	-0.29	0.08	0.18	
Rie	-0.39	-0.98	0.29	0.96	0.29

Residuals ACF



Cumulated periodogram



● 10.15 - Modelo CO₂

■ 0-39 min

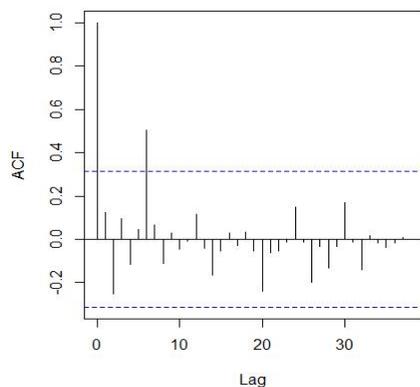
Coefficients:

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)	dF/dPar	dPen/dPar
Cint0	4.7000e+02	8.0012e+00	5.8741e+01	4.4409e-16	-1.5484e-07	0
Ce	4.8555e+02	3.9549e+00	1.2277e+02	2.2204e-16	-1.6035e-06	0
e22	-1.0792e+01	3.6114e+01	-2.9883e-01	7.6689e-01	-1.1563e-08	0
p22	2.2726e+00	1.3649e-01	1.6651e+01	2.2293e-13	-6.2898e-09	0
Qvent	5.3609e+01	2.3592e+01	2.2723e+00	2.9662e-02	2.3622e-08	0

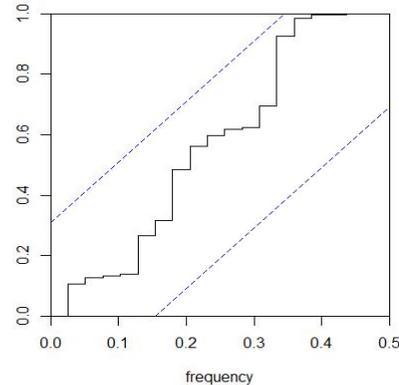
Correlation of coefficients:

	Cint0	Ce	e22	p22
Ce	0.00			
e22	0.00	0.01		
p22	0.02	0.06	0.00	
Qvent	0.03	0.12	0.00	0.54

Residuals ACF



Cumulated periodogram



■ 40-67 min

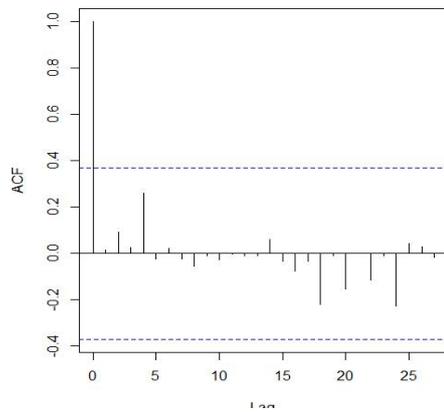
Coefficients:

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)	dF/dPar	dPen/dPar
Cint0	4.6917e+02	7.6682e+00	6.1184e+01	2.6113e-11	-5.3631e-06	0
Ce	4.3966e+02	1.2373e+01	3.5534e+01	4.4316e-11	5.5581e-06	0
e22	1.4568e+00	3.8287e+00	3.8049e-01	7.0710e-01	2.0378e-08	0
p22	2.0367e+00	3.2014e-01	6.3618e+00	4.4459e-06	-2.2409e-07	0
Qvent	1.7949e+01	1.9591e+01	9.1620e-01	3.6914e-01	1.9133e-08	0

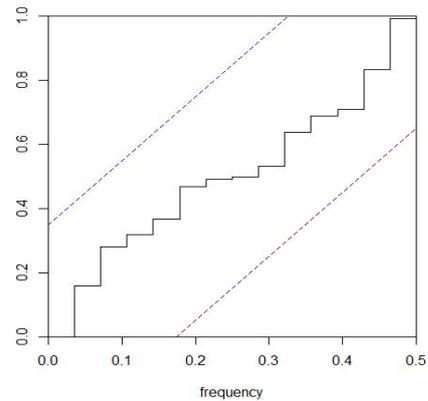
Correlation of coefficients:

	Cint0	Ce	e22	p22
Ce	-0.02			
e22	0.10	-0.19		
p22	-0.09	0.25	-0.80	
Qvent	0.04	0.21	-0.14	0.30

Residuals ACF



Cumulated periodogram



■ 68-120 min

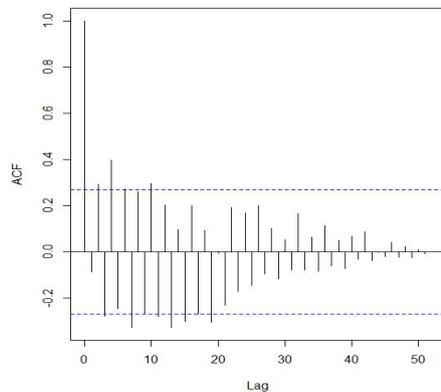
Coefficients:

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)	dF/dPar	dPen/dPar
Cint0	4.9587e+02	1.1903e+01	4.1659e+01	0.0000e+00	-1.6296e-05	0e+00
Ce	5.3258e-04	5.2588e-04	1.0127e+00	3.1628e-01	-1.3490e-07	0e+00
e22	4.5280e+00	3.3952e-01	1.3336e+01	3.9968e-15	-2.7246e-06	1e-04
p22	2.2184e+00	2.0674e-01	1.0731e+01	6.1617e-13	1.4425e-06	0e+00
Qvent	-1.8850e+00	2.3615e-01	-7.9822e+00	7.4778e-10	3.2247e-06	0e+00

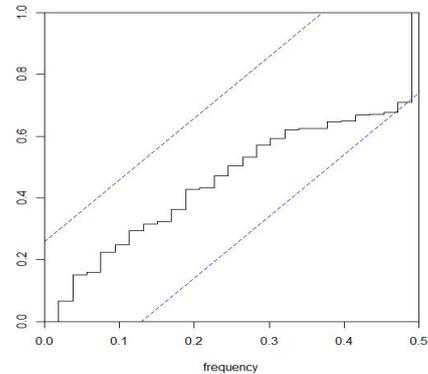
Correlation of coefficients:

	Cint0	Ce	e22	p22
Ce	-0.04			
e22	0.03	-0.92		
p22	-0.03	0.20	-0.46	
Qvent	0.05	-0.08	-0.04	0.05

Residuals ACF



Cumulated periodogram



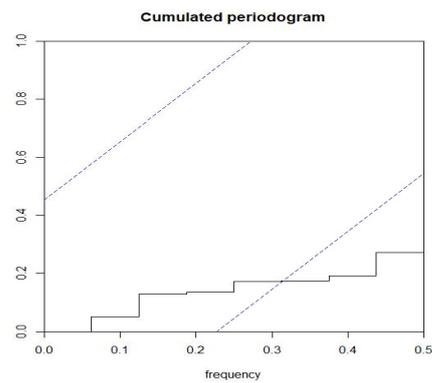
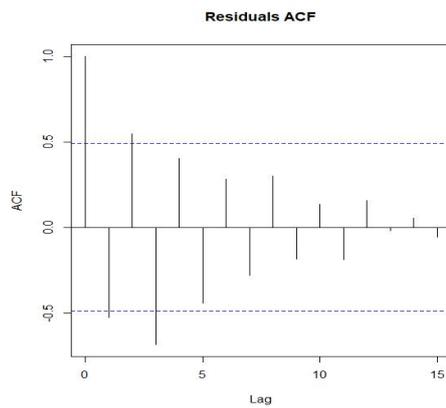
■ 121-136 min

Coefficients:

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)	dF/dPar	dPen/dPar
Cint0	1.1414e+03	1.7062e+01	6.6901e+01	4.8221e-06	-3.2187e-04	3e-04
Ce	4.7338e+02	5.0372e+01	9.3978e+00	4.1094e-05	-1.4899e-04	0e+00
e22	6.2945e+00	3.6300e-01	1.7340e+01	9.6614e-06	7.3098e-06	4e-04
p22	-8.5411e+00	1.4345e+03	-5.9542e-03	9.9536e-01	-3.3061e-08	0e+00
Qvent	1.5480e+01	2.3426e+00	6.6078e+00	1.8564e-04	1.0573e-04	0e+00

Correlation of coefficients:

	Cint0	Ce	e22	p22
Ce	0.48			
e22	0.07	0.00		
p22	-0.04	-0.05	0.01	
Qvent	0.63	0.97	0.02	-0.05



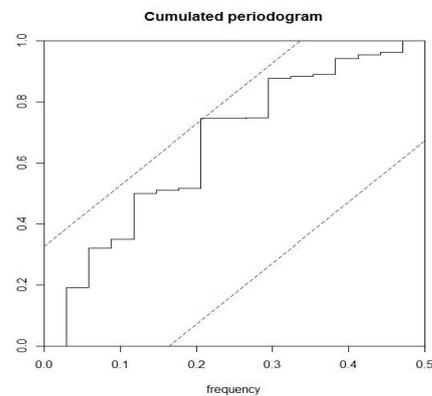
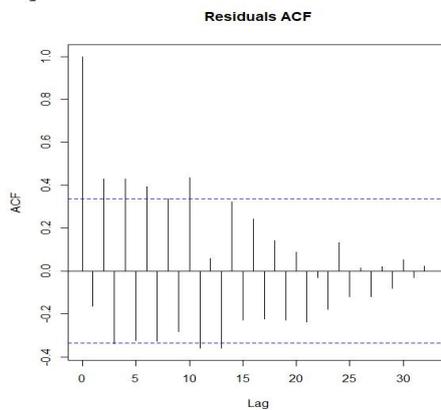
■ 137-170 min

Coefficients:

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)	dF/dPar	dPen/dPar
Cint0	5.9743e+02	6.3757e+00	9.3705e+01	5.3069e-14	-2.5523e-05	0e+00
Ce	1.2694e-07	5.6118e-05	2.2620e-03	9.9821e-01	1.9664e-10	0e+00
e22	3.8080e+00	3.6400e-01	1.0461e+01	1.0385e-09	6.3359e-06	1e-04
p22	1.6150e+00	2.5239e-01	6.3987e+00	1.1944e-06	1.3646e-06	0e+00
Qvent	-1.4494e+00	1.6896e-01	-8.5784e+00	1.6457e-08	2.9440e-07	0e+00

Correlation of coefficients:

	Cint0	Ce	e22	p22
Ce	0.00			
e22	-0.10	0.00		
p22	-0.15	0.00	-0.30	
Qvent	0.08	0.00	-0.06	0.04



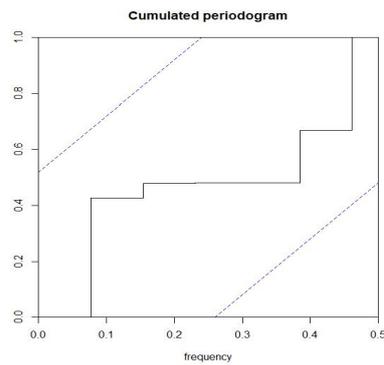
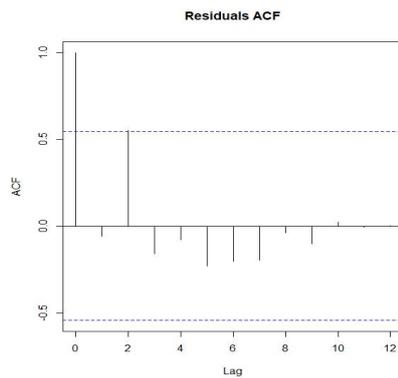
■ 170-183 min

Coefficients:

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)	dF/dPar	dPen/dPar
Cint0	8.9827e+02	9.7134e+00	9.2478e+01	1.0826e-04	9.2853e-08	1e-04
Ce	5.8354e-06	4.6402e-03	1.2576e-03	9.9903e-01	1.8460e-10	0e+00
e22	3.1334e+00	1.2126e+00	2.5841e+00	3.5490e-02	3.9410e-08	1e-04
p22	2.2539e+00	2.9126e-01	7.7384e+00	5.7685e-04	-3.6077e-09	0e+00
Qvent	1.1728e+00	4.6848e-01	2.5033e+00	3.9811e-02	-2.5473e-07	0e+00

Correlation of coefficients:

	Cint0	Ce	e22	p22
Ce	0.00			
e22	0.10	0.00		
p22	-0.02	0.00	-0.49	
Qvent	0.06	0.00	0.03	-0.02



● LS.4 - Modelo Térmico

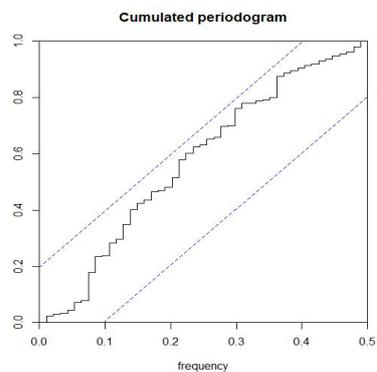
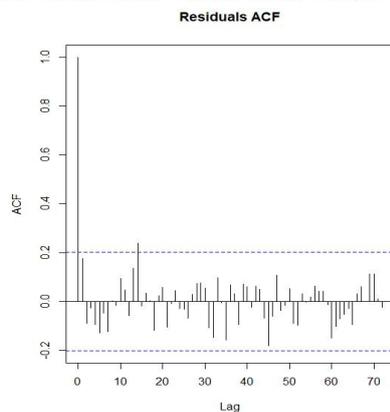
■ 0-70 min

Coefficients:

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)	dF/dPar	dPen/dPar
Ti0	2.2657e+01	1.0726e-02	2.1124e+03	0.0000e+00	-3.4440e-04	0.0103
Ci	5.0257e+02	4.7792e+01	1.0516e+01	2.2204e-16	6.2965e-06	-0.0067
e11	-8.1759e+00	2.0265e-01	-4.0344e+01	0.0000e+00	-1.8564e-04	0.0000
p11	-5.3109e+00	4.0672e-01	-1.3058e+01	0.0000e+00	-1.0784e-04	0.0000
Ph	7.3402e+00	1.1184e+00	6.5630e+00	4.4837e-09	3.0709e-04	0.0001
Rie	1.2638e-01	1.8609e-02	6.7910e+00	1.6675e-09	4.1048e-04	0.0000

Correlation of coefficients:

	Ti0	Ci	e11	p11	Ph
Ci	-0.23				
e11	0.16	-0.03			
p11	-0.26	0.18	-0.53		
Ph	0.06	-0.27	0.05	-0.02	
Rie	-0.18	0.62	-0.08	0.14	-0.90



● LS.4 - Modelo CO₂

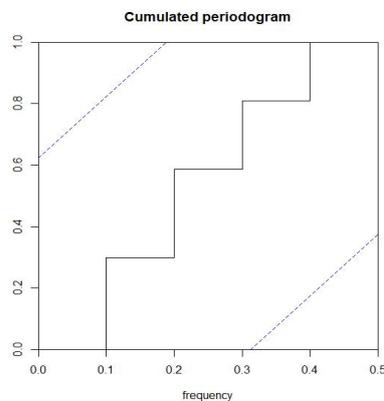
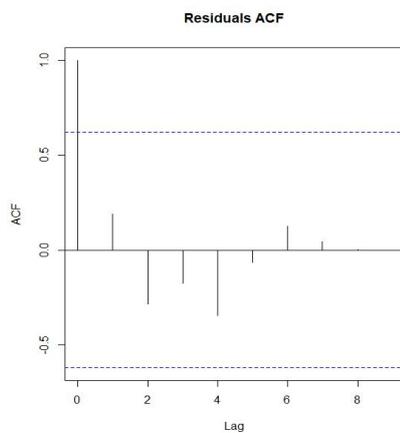
■ 0-10 min

Coefficients:

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)	dF/dPar	dPen/dPar
Cint0	5.6700e+02	4.2600e+00	1.3310e+02	2.6707e-03	-7.8301e-06	1e-04
Ce	5.6690e+02	2.9290e+00	1.9355e+02	2.6668e-03	-1.9655e-06	1e-04
e22	-1.0622e+01	9.0527e+02	-1.1734e-02	9.9111e-01	4.0017e-09	0e+00
p22	1.8655e+00	3.4790e-01	5.3623e+00	9.6618e-03	-4.3117e-07	0e+00
Qvent	2.0887e+02	1.7772e+02	1.1753e+00	2.9528e-01	-9.6829e-09	0e+00

Correlation of coefficients:

	Cint0	Ce	e22	p22
Ce	-0.04			
e22	0.02	0.01		
p22	-0.02	0.36	0.00	
Qvent	0.02	0.49	-0.01	0.78



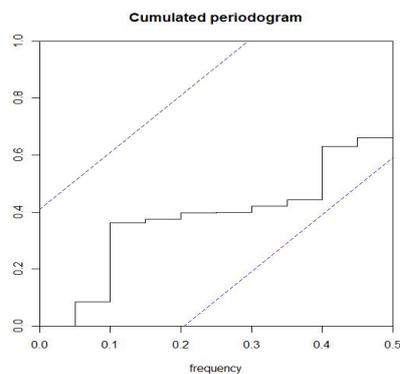
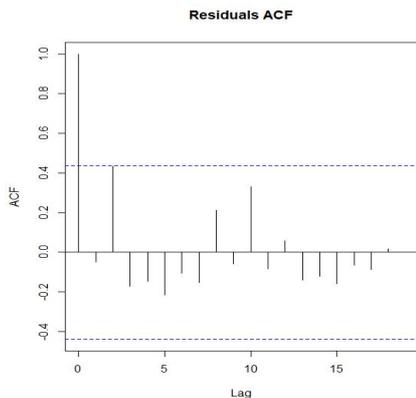
■ 11-30 min

Coefficients:

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)	dF/dPar	dPen/dPar
Cint0	5.6601e+02	6.9298e+00	8.1677e+01	7.7236e-08	-7.9666e-08	1e-04
Ce	1.7024e-07	5.9647e-03	2.8542e-05	9.9998e-01	-3.9826e-10	0e+00
e22	2.2065e+00	1.0081e+00	2.1888e+00	4.5648e-02	-6.1502e-09	0e+00
p22	1.8178e+00	2.4568e-01	7.3990e+00	1.4997e-05	-6.2513e-09	0e+00
Qvent	-9.7869e-01	5.4180e-01	-1.8064e+00	9.1623e-02	-2.9282e-09	0e+00

Correlation of coefficients:

	Cint0	Ce	e22	p22
Ce	0.00			
e22	0.18	0.00		
p22	-0.12	0.00	-0.39	
Qvent	0.02	0.00	-0.07	-0.05



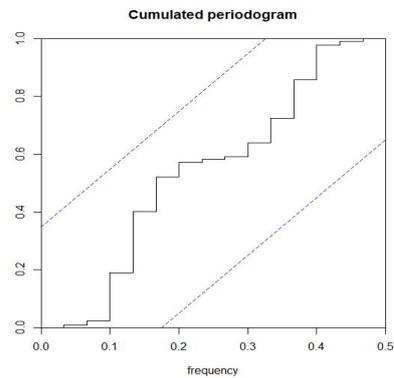
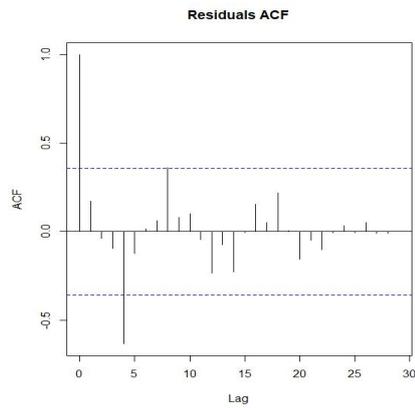
■ 31-60 min

Coefficients:

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)	dF/dPar	dPen/dPar
Cint0	6.4800e+02	4.7805e+00	1.3555e+02	2.7498e-12	-3.3593e-06	1e-04
Ce	6.4871e+02	2.4261e+00	2.6739e+02	2.6150e-12	-5.1709e-05	1e-04
e22	-1.1443e+01	1.5363e+02	-7.4486e-02	9.4122e-01	-4.1544e-08	0e+00
p22	1.8624e+00	1.7567e-01	1.0601e+01	5.7725e-09	-1.3983e-06	0e+00
Qvent	1.3525e+02	7.1709e+01	1.8861e+00	7.1202e-02	1.1672e-06	0e+00

Correlation of coefficients:

	Cint0	Ce	e22	p22
Ce	0.00			
e22	0.00	0.00		
p22	-0.01	0.29	0.00	
Qvent	0.00	0.41	-0.01	0.70



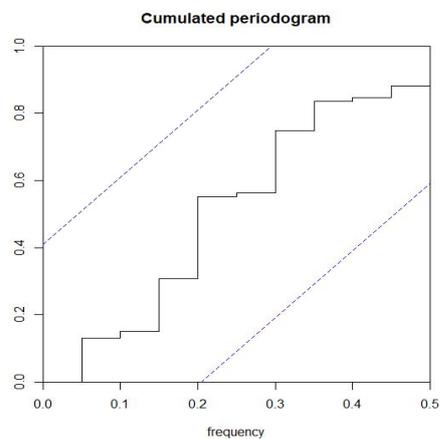
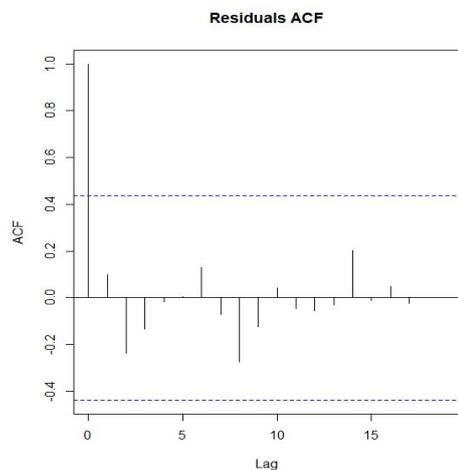
■ 61-80 min

Coefficients:

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)	dF/dPar	dPen/dPar
Cint0	6.4822e+02	5.1873e+00	1.2496e+02	7.4333e-08	2.9010e-06	1e-04
Ce	6.8508e-05	1.6591e+00	4.1291e-05	9.9997e-01	-6.3315e-10	0e+00
e22	2.3169e+00	1.1093e+00	2.0886e+00	5.4984e-02	-8.6276e-08	0e+00
p22	1.4507e+00	4.5871e-01	3.1625e+00	7.0792e-03	1.5636e-09	0e+00
Qvent	-1.6047e-01	3.5560e-01	-4.5126e-01	6.5831e-01	-6.7179e-08	0e+00

Correlation of coefficients:

	Cint0	Ce	e22	p22
Ce	0.00			
e22	0.26	0.00		
p22	-0.24	0.00	-0.81	
Qvent	0.09	0.00	0.06	-0.06



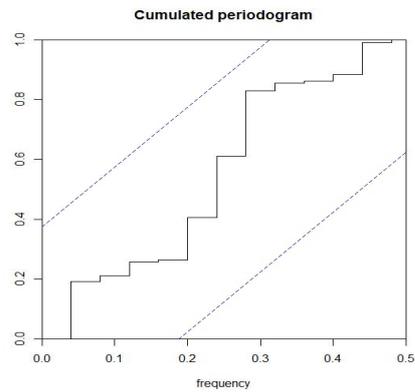
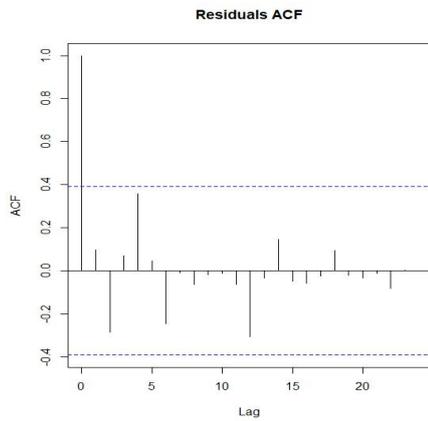
■ 81-105 min

Coefficients:

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)	dF/dPar	dPen/dPar
Cint0	6.7900e+02	6.6293e+00	1.0242e+02	4.5767e-10	-1.4490e-05	1e-04
Ce	6.7596e+02	6.3690e+00	1.0613e+02	4.5530e-10	4.0977e-06	1e-04
e22	-1.0525e+01	1.1084e+03	-9.4953e-03	9.9252e-01	-6.5244e-08	0e+00
p22	2.0874e+00	1.5842e-01	1.3176e+01	1.8024e-08	-1.0824e-06	0e+00
Qvent	7.1335e+01	4.3899e+01	1.6250e+00	1.2014e-01	4.1927e-08	0e+00

Correlation of coefficients:

	Cint0	Ce	e22	p22
Ce	0.02			
e22	-0.06	0.01		
p22	-0.01	0.26	-0.02	
Qvent	0.00	0.50	0.00	0.52



■ 106-143 min

Coefficients:

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)	dF/dPar	dPen/dPar
Cint0	6.9195e+02	3.5394e+00	1.9550e+02	8.8818e-16	1.1168e-02	1e-04
Ce	4.2116e+02	2.9174e+01	1.4436e+01	2.1352e-12	4.8807e-03	0e+00
e22	4.0418e+00	2.2906e-01	1.7645e+01	2.4336e-13	-1.3998e-04	1e-04
p22	-8.6577e+00	9.9352e+02	-8.7141e-03	9.9310e-01	-1.2596e-06	0e+00
Qvent	6.1772e+00	1.0075e+00	6.1309e+00	1.1952e-06	-2.5453e-03	0e+00

Correlation of coefficients:

	Cint0	Ce	e22	p22
Ce	0.54			
e22	-0.03	-0.04		
p22	0.00	0.00	0.00	
Qvent	0.64	0.99	-0.04	0.00

