

02-017

### **CHARACTERISATION AND DESIGN OF A REDUCE MODEL OF ROOMS IN EDUCATIONAL BUILDINGS TO COMBAT PANDEMICS**

Tugores, Juan <sup>(1)</sup>; Canals, Lluç <sup>(1)</sup>

<sup>(1)</sup> Universitat Politècnica de Catalunya

This master's thesis presents a model for analysing and predicting indoor environmental quality in educational buildings. It is part of the ComMit-20 project, which aims to establish the impact of COVID-19 on energy consumption and well-being in buildings. First, the measures taken by universities and governments in the aftermath of the pandemic have been collected. In addition, governmental concepts and regulations concerning thermal comfort and indoor air quality are presented. Second, the methodology for designing the models is described. It is established that the temperature depends on the characteristics of the classroom, the heat generation of the occupants, and the heating. The CO<sub>2</sub> concentration varies due to the breathing of the users and the existing ventilation. The data collection process is defined, as well as the characteristics of the two study rooms that have been analysed during the course of the project. Based on the collected data, the current status has been analysed, and the models developed have been validated. The result is a method for predicting indoor air behaviour in university classrooms in order to optimise air conditioning systems.

*Keywords:* indoor air quality; thermal comfort; stochastic modelling; COVID-19

### **CARACTERIZACIÓN Y DISEÑO DE UN MODELO REDUCIDO DE SALAS DE EDIFICIOS EDUCATIVOS PARA COMBATIR LA PANDEMIA**

Este trabajo de final de máster presenta un modelo para analizar y predecir la calidad ambiental en el interior de salas educativas. Se engloba dentro del proyecto ComMit-20 que tiene como objetivo establecer el impacto de la COVID-19 con respecto al consumo de energía y el bienestar en los edificios. Primero, se han recogido las medidas adoptadas por las universidades y los gobiernos a raíz de la pandemia. Además, se exponen los conceptos y regulaciones gubernamentales referentes al confort térmico y calidad interior de aire. Segundo, se describe la metodología para diseñar los modelos. Se establece que la temperatura depende de las características del aula, la generación de calor de los ocupantes y de la calefacción. La concentración de CO<sub>2</sub> varía debido a la respiración de los usuarios y a la ventilación existente. Se define el proceso de recogida de datos, así como una caracterización de las dos salas de estudio analizadas durante el transcurso del proyecto. A partir de los datos recogidos, se ha analizado el estado actual y se han validado los modelos desarrollados. El resultado es un método para predecir el comportamiento interior del aire en aulas universitarias con el fin de optimizar los sistemas de climatización.

*Palabras clave:* calidad interior del aire; confort térmico; modelización estocástica; COVID-19

*Agradecimientos:* Agradecimiento a Lluç Canal Casals por toda la dedicación y el esfuerzo que han depositado para la realización del proyecto. También quiero agradecer a Alba Ruiz de Alegría por el trabajo prestado en el proceso de monitorización.



© 2023 by the authors. Licensee AEIPRO, Spain. This article is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

## 1. Introducción

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. En España, se implementaron un conjunto de recomendaciones para evitar la propagación del virus y mantener a la población a salvo. En los centros docentes de enseñanza superior, a partir del inicio de curso académico 2021/22, se retomó la actividad presencial adecuando los espacios para adecuarse al cumplimiento de las restricciones sanitarias.

Uno de los puntos clave se centraba en asegurar una correcta calidad del aire en el interior de las aulas de docencia, puesto que la vía principal de transmisiones del virus es a través del aire (Organización Mundial de la Salud, 2020). Para ello, se requería que los espacios dispusieran de una ventilación natural continua, renovando así el aire interior con el aire exterior (Universidad Politécnica de Catalunya, 2021). Debido a las medidas sanitarias adoptadas, surgió la necesidad de investigar las condiciones de calidad ambiental interior en edificios universitarios y comprobar si los métodos de ventilación propuestos eran eficientes. El proyecto ComMit-20 se desarrolló con el objetivo de establecer el impacto a largo y corto plazo de la situación de la pandemia COVID-19 con respecto al consumo, cambios en los patrones de uso y mayores requisitos de calidad de aire interior y confort térmico en los edificios (IREC, 2021).

El CO<sub>2</sub> es un buen indicador de la calidad del aire. Se trata de uno de los gases intrínsecos de los edificios, ya que es generado por los usuarios, y está estrechamente relacionado con la salud humana (Azuma et al., 2018). El confort térmico, por otro lado, se define como la satisfacción del usuario con el ambiente, por lo tanto, es subjetiva y depende de diversos factores.

Sin embargo, el estado español establece en el Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios (RITE), los valores límite para el bienestar de los ocupantes. Se recomienda una temperatura de 21°C en recintos calefactados (Gobierno de España, 2007), y siempre entre 17 y 27°C según el Real Decreto 486/1997 de disposiciones mínimas de seguridad y salud en los puestos de trabajo (Gobierno de España, 1997). En cuanto a la temperatura, en aulas de docencia, se limita la concentración de CO<sub>2</sub> a 900 ppm (calidad buena de aire), aunque en tiempos de pandemia este valor se redujo a 700 ppm, valor límite para centros sanitarios (Gobierno de España, 2007).

Uno de los estudios realizados dentro del marco del proyecto fue el análisis de las condiciones ambientales en la Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial de Barcelona (ETSEIB), mediante la evaluación de la temperatura interior, la humedad relativa y el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). Los resultados mostraron que, la ventilación mecánica comporta una mejor renovación del aire frente a la ventilación natural (Ruiz de la Alegría, et al., 2022). Además, la ventilación natural provocaba que las temperaturas del espacio afectaran negativamente al confort térmico de los usuarios, hasta el punto de abandonar el aula porque se recomendaba mantener la ventilación.

Con este conocimiento, se observa que el balance entre la calidad interior del aire y el confort térmico de los usuarios es clave para la correcta calidad ambiental, no obstante, el comportamiento de ambos indicadores depende de la tipología de espacio y las condiciones ambientales exteriores. Para poder evaluar la calidad ambiental interior, se propone el diseño de un modelo reducido capaz de predecir la evolución de la temperatura y de la concentración CO<sub>2</sub>, con el fin de actuar en consecuencia para asegurar una correcta calidad ambiental interior.

## 2. Metodología

Para el desarrollo del modelo de salas reducido, se ha utilizado la técnica de modelaje de caja gris (*grey box modeling*). Las técnicas de modelización de caja gris surgen como combinación del conocimiento de las propiedades físicas que rigen el sistema y los datos estadísticos del modelo empírico. Estos modelos constan de una función determinista (comportamiento teórico) y una parte estocástica, que representa el comportamiento real del sistema. Para su construcción, se necesita una observación en tiempo discreto del sistema físico subyacente que permita estimar los parámetros desconocidos que rigen el sistema. La combinación de conocimientos físicos y datos experimentales puede utilizarse para identificar la parametrización adecuada del modelo (Bacher & Madsen, 2011).

En la modelización, el primer paso consiste en formular el sistema de estados (1), mediante ecuaciones diferenciales estocásticas (EDEs). Estas representan las relaciones físicas ordinarias ( $f$ ) que dependen de: los estados del sistema ( $X_t$ ), los datos experimentales ( $U_t$ ) y los parámetros desconocidos ( $\theta$ ). A este término se añade un proceso estocástico denominado proceso de Weiner ( $G$ ), que describe el proceso de difusión del sistema. Para completar la representación del espacio de estados, se incluye la salida monitorizada del sistema  $Y_{t,k}$  (2), que depende de una función enlace ( $h$ ), que relaciona la salida con las variables de estado, y un error gaussiano ( $e_t$ ) para representar el ruido de la medición (Bacher & Madsen, 2011).

$$X_t = f(X_t, U_t, \theta, t) \cdot dt + G(\theta, t) \cdot d\omega_t \quad (1)$$

$$Y_{t,k} = h(X_t, U_t, \theta, t) \cdot dt + e_t \quad (2)$$

El objetivo de la modelización es estimar los parámetros desconocidos ( $\theta$ ) en el modelo de tiempo continuo mediante el método de máxima verosimilitud (Bacher & Madsen, 2011). Por último, con la misma observación de datos utilizada para determinar  $\theta$ , es posible validar el modelo utilizando el estado descrito.

Las ventajas de los modelos de caja gris, tales como su sencillez, fiabilidad, rapidez y bajos requerimientos computacionales, han llevado a su uso generalizado en diversas aplicaciones en el ámbito de la energía de edificios (Bacher & Madsen, 2011). Los modelos de caja gris también se han utilizado con éxito para predecir el comportamiento térmico de un edificio (Li et al., 2021) y la demanda energética (Brastein et al., 2021).

### 2.1. Descripción de los modelos

El modelo reducido utilizado para predecir la evolución de la temperatura interior ( $T_i$ ) se ha diseñado partiendo de los ejemplos más simples y completos proporcionados por la literatura (Bacher & Madsen, 2011). La ecuación de estados del modelo térmico (3), y (4), se basa en el principio físico de transmisión de calor entre el interior y los elementos constructivos del espacio, además de las fuentes de generación de calor:

$$T_i = [(T_e - T_i) / R_{ie} + \Phi_h + P \cdot \Phi_p] \cdot dt / C_i + \exp(z_{11}) \cdot d\omega_1 \quad (3)$$

$$yT_i = T_i + \exp(z_{12}) \quad (2)$$

Dónde la variable de medida es la temperatura interior obtenida de las mediciones ( $yT_i$ ) y las entradas del sistema son la ocupación del aula ( $P$ ) y la temperatura del exterior ( $T_e$ ). Los parámetros del modelo son:

- $C_i$ , la capacidad térmica de los elementos del aula: paredes y mobiliario.
- $R_{ie}$ , la resistencia térmica entre el interior y la envolvente.

- $\Phi_h$ , el calor medio generado por el sistema de climatización y los aparatos electrónicos.
- $\Phi_p$  es el calor generado por los usuarios del aula. Este valor se ha fijado para minimizar el proceso de cálculo del modelo. La generación de calor sensible de un adulto medio es de 70 W para una actividad de trabajo ligero de oficina (IDEA, 2021).

En el caso del modelo reducido utilizado para predecir la evolución de la concentración interior de CO<sub>2</sub> ( $C_{int}$ ), este se basa en el principio de balance másico de un gas en un volumen específico (Macarulla et al., 2017). La ecuación de estados del modelo CO<sub>2</sub> (4), y (5), representa la variación de la concentración del gas en función de la renovación de aire y la generación interior:

$$C_{int} = [f \cdot Q_{ven} \cdot (C_{ven} - C_{int}) + P \cdot K_{occ}] \cdot dt / V + \exp(z_{21}) \cdot dw_2 \quad (4)$$

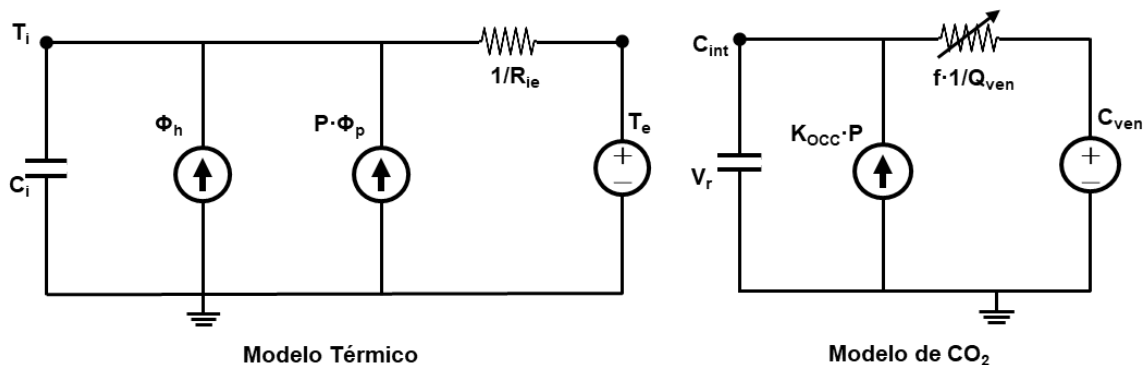
$$yC_{int} = C_{int} + \exp(z_{22}) \quad (5)$$

Dónde la variable de medida es la concentración de dióxido de carbono interior obtenida de las mediciones ( $yC_{int}$ ) y las entradas del sistema son: la ocupación ( $P$ ), el volumen ( $V$ ) y la activación del sistema de ventilación ( $f$ ). Los parámetros del modelo son:

- $C_{ven}$ , la concentración de dióxido de carbono del aire exterior de renovación.
- $Q_{ven}$ , el caudal de ventilación (natural o mecánica). Este parámetro está controlado por la variable  $f$  que indica el número de aperturas de la ventilación. En el caso de ventilación natural, las ventanas y puertas abiertas. Para la ventilación mecánica, 0 si está apagada y 1 si está encendida.
- $K_{occ}$ , la generación de CO<sub>2</sub> por persona. Este valor se ha fijado para minimizar el proceso de cálculo del modelo. Según normativa española del Código Técnico de la Edificación (CTE): Documento Básico HS Salubridad (DB-HS), este valor es de 19 l/h-ocupante (Gobierno de España, 2006). Sin embargo, un estudio de la estimación de CO<sub>2</sub> mediante modelos de caja gris en oficinas (Macarulla et al., 2017), determino que el valor asociado a un ambiente de trabajo sencillo era inferior, 12.74 l/h-ocupante.

La figura 1 muestra la representación de los modelos mediante circuitos RC.

Figura 1: Esquema RC de los modelos



### 2.3. Validación del modelo

Una vez diseñados los modelos, es necesario validarlos mediante datos. No obstante, previamente, es necesario indicar los rangos de valores entre los que se moverán los distintos parámetros desconocidos a la hora de interpolar la solución. Estos límites se han

establecido en la tabla 1 y surgen de valores disponibles en la literatura (Bacher & Madsen, 2011 y Macarulla et al., 2017).

**Tabla 1. Rangos de parámetros**

| Modelo                 | Parámetros                      | Valor inicial | Límite inferior | Límite superior |
|------------------------|---------------------------------|---------------|-----------------|-----------------|
| Modelo Térmico         | $C_i$ [MJ/°C]                   | 90            | 0               | 100             |
|                        | $R_{ie}$ [°Cs/kJ]               | 15            | 0               | 30              |
|                        | $\Phi_h$ [kJ/s]                 | 50            | 0               | 100             |
|                        | $z_{11}$ [-]                    | 0             | -20             | 20              |
|                        | $z_{12}$ [-]                    | 0             | -50             | 50              |
| Modelo CO <sub>2</sub> | $C_{ven}$ [ppm]                 | 400           | 300             | 2000            |
|                        | $Q_{ven}$ [m <sup>3</sup> /min] | 20            | 0               | 50              |
|                        | $z_{21}$ [-]                    | 0             | -20             | 20              |
|                        | $z_{22}$ [-]                    | 0             | -50             | 50              |

Para la validación estadística de los resultados, en primer lugar, se realiza una prueba de significación de los resultados. Los parámetros obtenidos deben tener un valor de probabilidad ( $Pr(<|t|)$ ) inferior a 0.05; en caso contrario, se consideran no significativos (CTSM-R Development Team, 2021). A continuación, se calcula la derivada de la función objetivo con respecto al parámetro ( $dF/dPar$ ). Si el valor no se aproxima a cero, es probable que la solución no sea un verdadero óptimo. Seguidamente, se calcula la derivada de la función de penalización con respecto al parámetro ( $dPen/dPar$ ). Si este valor es significativo, es posible que el parámetro se esté acercando a uno de sus límites. En consecuencia, la estimación debe repetirse con nuevos límites (CTSM-R Development Team, 2021).

En segundo lugar, se calcula la matriz de correlación del parámetro para garantizar que los valores fuera de diagonal estén lejos de 1 o -1. De lo contrario, el modelo podría estar sobre parametrizado (CTSM-R Development Team, 2021). Además, se evalúa la hipótesis de ruido blanco mediante un gráfico de autocorrelación (ACF) y el periodograma acumulado (Macarulla et al., 2017).

Por último, se ejecuta una simulación con los parámetros obtenidos y los datos de observación para ver si el modelo determinista obtenido predice con precisión el sistema real. Además, para corroborar que el modelo funciona para diferentes escenarios, se verificara con un nuevo set de datos correspondientes al mismo espacio, pero otro periodo de medida, utilizando los parámetros estimados originalmente.

La implementación y validación de los modelos de caja gris se ha realizado mediante el paquete CTSM-R versión 1.0.0 para R (CTSM-R Development Team, 2021). Se utilizó un ordenador personal Intel Core i7 a 2,60 GHz. El paquete CTSM-R incluye todas las pruebas estadísticas mencionadas (CTSM-R Development Team, 2021).

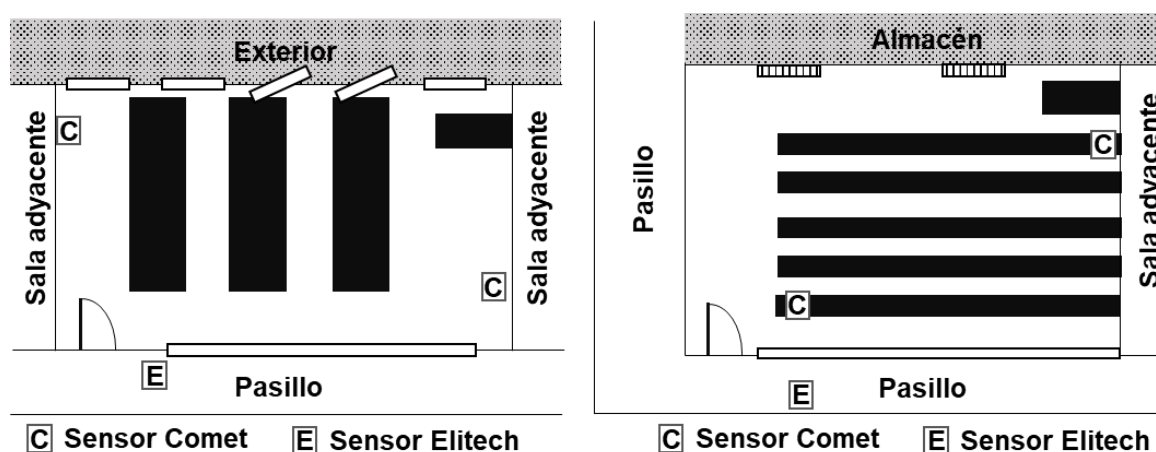
### 3. Caso de estudio

Los datos obtenidos para la estimación de los parámetros de los modelos provienen del análisis climático realizado en la ETSEIB en el marco del proyecto ComMit-20 (Ruiz de la Alegría, et al., 2022). Este se ha realizado durante horario lectivo en dos aulas desde el 19 de noviembre hasta el 1 de diciembre de 2021, con un periodo de muestro de 1 min. La toma de datos recoge las variables de entrada asociadas a los modelos (apartado 2): temperatura interior, concentración de CO<sub>2</sub> interior, temperatura exterior de la sala (en la

zona de tránsito del interior del edificio), ocupación del aula y apertura/cierre del sistema de ventilación. 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, y a través de la supervisión de dos investigadores. La disposición de las aulas y los sensores se muestra en la figura 2 y las características de los espacios analizados son:

- El aula 10.15 (A1) se encuentra en el décimo piso, tiene un aforo aproximado de 30 personas y cuenta con el mobiliario estándar de un aula de docencia universitaria. Tiene un volumen de 140 m<sup>3</sup> y climatización de la sala se realiza mediante la calefacción central del edificio. Está delimitada por otras dos salas de estructura similar, una puerta que conecta al pasillo y la fachada, que cuenta cinco ventanas, de las cuales solo dos se pueden abrir.
- El aula LS.4 (A2) se encuentra bajo tierra. Tiene un aforo aproximado de 40 personas y cuenta con el mobiliario estándar de un aula de docencia universitaria. Está rodeada por una zona de tránsito, una sala de almacén y otra aula de las mismas características. Su volumen es de aproximadamente de 240 m<sup>3</sup>. La pared donde se ubica la puerta, está formada por cuatro ventanales translúcidos fijos. Posee un equipo de climatización automático y cuenta con un sistema de renovación de aire automático (Ruiz de la Alegría, et al., 2022).

**Figura 2: Disposición de las aulas y de los sensores en A1 (izquierda) y A2 (derecha)**



Para la obtención de los parámetros en el interior de la sala se han utilizado 2 sensores COMET, modelo U3430, capaces de recabar los datos sin necesidad de conexión a la corriente y su tamaño reducido permite disponerlos fácilmente en el espacio sin dificultar el paso. Adicionalmente, en la zona de los pasillos donde se encuentran las aulas, se ha dispuesto un sensor de Elitech RC-5. Este aparato, a diferencia del anterior, tan solo mide la temperatura. Las características técnicas de los dispositivos se indican en la tabla 2:

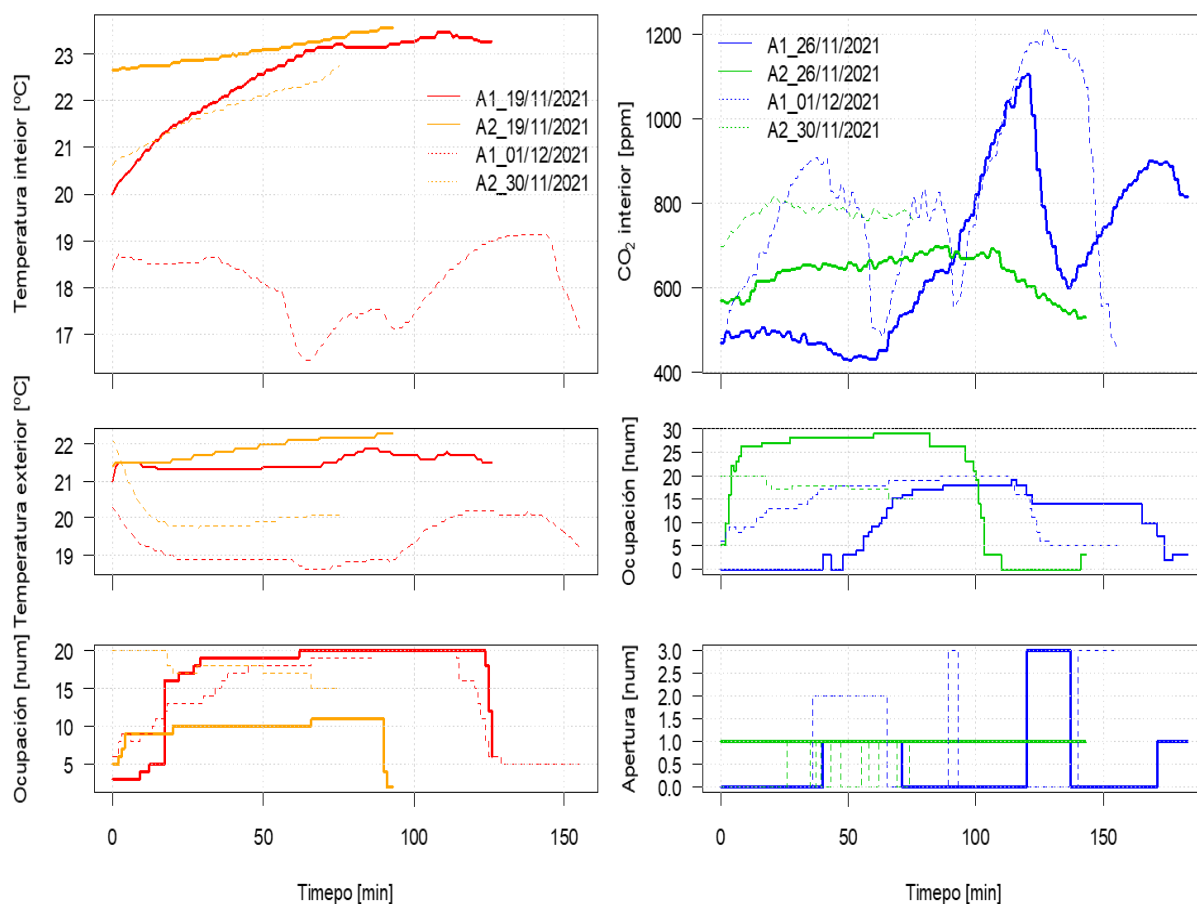
**Tabla 2. Características técnicas de los sensores**

| Variable              | Sensor  | Rango de Medida | Resolución | Precisión                   |
|-----------------------|---------|-----------------|------------|-----------------------------|
| Temperatura [°C]      | Comet   | -20 a 60        | 0.1        | ± 0.4                       |
|                       | Elitech | -30 a 70        |            | ± 0.5 (20-40) / ± 1 (resto) |
| CO <sub>2</sub> [ppm] | Comet   | 0 a 5,000       | 1          | ± (50 + 3% lectura)         |

Para la estimación de los parámetros desconocidos y la validación de los modelos descritos en el apartado 2, se han utilizado los datos del 19 de noviembre de 2021 (modelo térmico) y los del 26 de noviembre de 2021 (modelo dióxido de carbono). Para comprobar si los parámetros obtenidos pueden usarse para otro periodo de observación, se han aplicado los modelos utilizados con datos del 30 de noviembre y del 1 de diciembre de las aulas A2 y A1 respectivamente.

La figura 3 muestra la evolución de las temperaturas y las concentraciones de CO<sub>2</sub>, además de las variables de entrada de los modelos: temperatura exterior, ocupación y apertura de la ventilación.

**Figura 3: Monitorización térmica (izquierda) y de CO<sub>2</sub> (derecha) según el aula y periodo**



Estas observaciones son una pequeña representación de la problemática que se pretende solucionar con el desarrollo de los modelos. En el caso de la temperatura (figura 3, izquierda), la mayoría de los días evaluados, la temperatura estaba por encima de los 21°C (valor límite según las recomendaciones del RITE). Por otro lado, para el aula A1 el día 1 de diciembre, este valor es inferior a 19°C en todo el periodo, incluso menor a los 17°C estipulados en el RD 486/1997. Si observamos las concentraciones de CO<sub>2</sub> (figura 3, derecha), vemos que el aula A2 (ventilación mecánica) asegura una correcta calidad del aire para todos los días analizados (<900 ppm). En cambio, el aula A1 que dispone de ventilación natural, se observan valores de concentración peligrosamente altos, además de que el comportamiento de apertura/cierre de ventanas y puertas, aún siendo capaces de reducir los niveles a valores saludables, no se realiza de forma eficiente para mantener a los ocupantes seguros.

## 4. Resultados

En este apartado se muestran los resultados de los parámetros obtenidos del modelo térmico y de CO<sub>2</sub> y su análisis de validez estadística. Asimismo, se incluye una simulación donde se ha utilizado los valores de los modelos para otros periodos de medida.

### 4.1. Modelo térmico

Partiendo de los valores obtenidos en las monitorizaciones de CO<sub>2</sub> (apartado 3.2), el valor de los parámetros estimados mediante CTSM-R del modelo de CO<sub>2</sub> se han recogido en la tabla 3:

**Tabla 3 Parámetros estimados del Modelo CO<sub>2</sub>**

| Aula | Parámetros        | Estimado | Error Std | Pr(< t ) | dF/dPar | dPen/dPar |
|------|-------------------|----------|-----------|----------|---------|-----------|
| A1   | $C_i$ [MJ/°C]     | 4.09     | 1.13      | 0.00     | 0.00    | 0.00      |
|      | $R_{ie}$ [°Cs/kJ] | 0.05     | 0.01      | 0.00     | 0.00    | 0.00      |
|      | $\Phi_h$ [kJ/s]   | 37.31    | 11.15     | 0.00     | 0.00    | 0.00      |
|      | $z_{11}$ [-]      | -3.34    | 0.06      | 0.00     | 0.00    | 0.00      |
|      | $z_{12}$ [-]      | -23.82   | 2.48      | 0.00     | 0.00    | 0.00      |
| A2   | $C_i$ [MJ/°C]     | 3.01     | 1.3       | 0.00     | 0.00    | 0.00      |
|      | $R_{ie}$ [°Cs/kJ] | 1.27     | 1.18      | 0.02     | 0.00    | 0.00      |
|      | $\Phi_h$ [kJ/s]   | 1.03     | 0.73      | 0.04     | 0.00    | 0.00      |
|      | $z_{11}$ [-]      | -5.31    | 0.47      | 0.00     | 0.00    | 0.00      |
|      | $z_{12}$ [-]      | -8.18    | 0.20      | 0.00     | 0.00    | 0.00      |

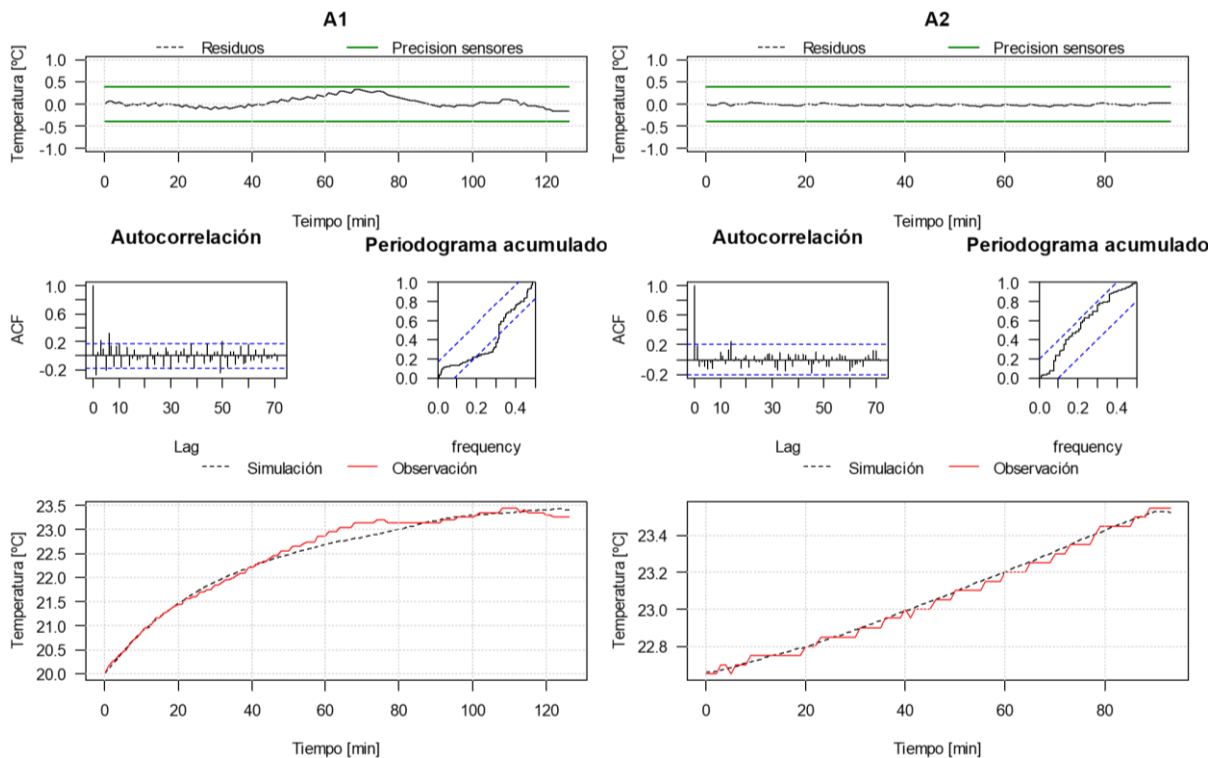
Analizando los valores de la tabla 3, vemos que los parámetros obtenidos por el modelo son razonables. La capacidad térmica ( $C_i$ ) de ambas aulas es del mismo orden de magnitud, puesto que la tipología de estructura y mobiliario es similar. Sin embargo, se ve una diferencia sustancial en el parámetro de la resistencia térmica de la envolvente ( $R_{ie}$ ), siendo 0.05 en el aula A1 y 1.27 en el aula A2. Esta diferencia es esperada puesto que A1 está ubicada a gran altura, en contacto al exterior y se construyó con materiales antiguos (hace 50 años), mientras que A2 está bajo tierra y su construyo con materiales más modernos.

Sobre la generación de calor media ( $\Phi_h$ ), también se observa mucha diferencia. En el aula de ventilación natural (A1), al tener que hacer frente a las pérdidas de calor con el exterior y la entrada de aire, muestra un valor muy por encima que A2, que está más aislada.

Podemos considerar que todos los parámetros son significativos ( $Pr(<|t|) < 0.05$ ) y que el valor estimado de cada uno corresponda a un óptimo verdadero. En la figura 4 se muestra el resumen de la validación estadística del modelo. La desviación estándar de los residuos, diferencia entre la observación y la simulación, se encuentran por debajo de la precisión de los sensores: 0.12°C para A1 y 0.02°C para A2. Los gráficos de autocorrelación y el periodograma acumulado muestran que la mayoría de los resultados se encuentran dentro de las bandas de confianza del 95%, validando la hipótesis del que el ruido es blanco. Finalmente, en la simulación determinista del modelo se observa que la aproximación sigue claramente la tendencia observada durante la monitorización.



Figura 4: Resultados del Modelo de CO<sub>2</sub> para el aula A1 (izquierda) y A2 (derecha)



#### 4.2. Modelo CO<sub>2</sub>

Siguiendo un proceso similar al modelo térmico, partiendo de los valores obtenidos en las monitorizaciones de CO<sub>2</sub> (apartado 3.2), el valor de los parámetros estimados mediante CTSM-R del modelo de CO<sub>2</sub> se han recogido en la tabla 4:

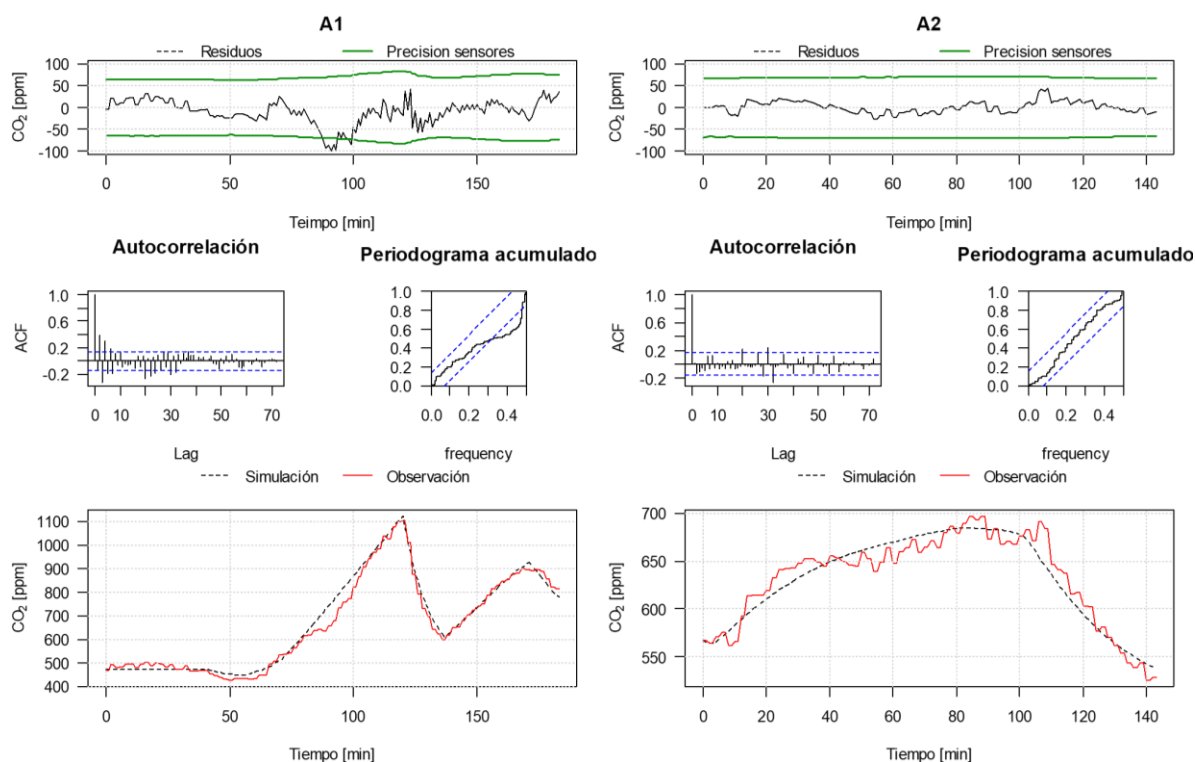
Tabla 4 Parámetros estimados del Modelo CO<sub>2</sub>

| Aula | Parámetros                      | Estimado | Error Std | Pr(< t ) | dF/dPar | dPen/dPar |
|------|---------------------------------|----------|-----------|----------|---------|-----------|
| A1   | $C_{ven}$ [ppm]                 | 358.21   | 46.82     | 0.00     | 0.00    | 0.00      |
|      | $Q_{ven}$ [m <sup>3</sup> /min] | 4.24     | 0.51      | 0.00     | 0.00    | 0.00      |
|      | $z_{21}$ [-]                    | 2.09     | 0.11      | 0.00     | 0.00    | 0.00      |
|      | $z_{22}$ [-]                    | 4.44     | 0.17      | 0.00     | 0.00    | 0.00      |
| A2   | $C_{ven}$ [ppm]                 | 489.02   | 56.56     | 0.00     | 0.00    | 0.00      |
|      | $Q_{ven}$ [m <sup>3</sup> /min] | 8.06     | 3.66      | 0.00     | 0.00    | 0.00      |
|      | $z_{21}$ [-]                    | 1.88     | 0.13      | 0.03     | 0.00    | 0.00      |
|      | $z_{22}$ [-]                    | 1.84     | 0.93      | 0.00     | 0.00    | 0.00      |

Analizando los valores de la tabla 4, vemos que los parámetros obtenidos por el modelo son razonables. La concentración del exterior ( $C_{ven}$ ) es del mismo orden de magnitud en las diferentes aulas y concordes con valores observados en zonas metropolitanas (420 ppm). En cuanto al caudal de ventilación ( $Q_{ven}$ ), el aula A1 presenta un caudal menor que el de A2, diferencia esperada puesto que la ventilación mecánica, en general, es más efectiva que la natural, ya que no depende de las condiciones climáticas exteriores.

Podemos considerar que todos los parámetros son significativos ( $\Pr(<|t|) < 0.05$ ) y que el valor estimado de cada uno corresponda a un óptimo verdadero. En la figura 5 se muestra el resumen de la validación estadística del modelo. La desviación estándar de los residuos, diferencia entre la observación y la simulación, se encuentran por debajo de la precisión de los sensores: 29 ppm para A1 y 13 ppm para A2. Los gráficos de autocorrelación y el periodograma acumulado muestran que la mayoría de los resultados se encuentran dentro de las bandas de confianza del 95%, validando la hipótesis del que el ruido es blanco. Finalmente, en la simulación determinista del modelo se observa que la aproximación sigue claramente la tendencia observada durante la monitorización.

**Figura 5: Resultados del Modelo de CO<sub>2</sub> para el aula A1 (izquierda) y A2 (derecha)**

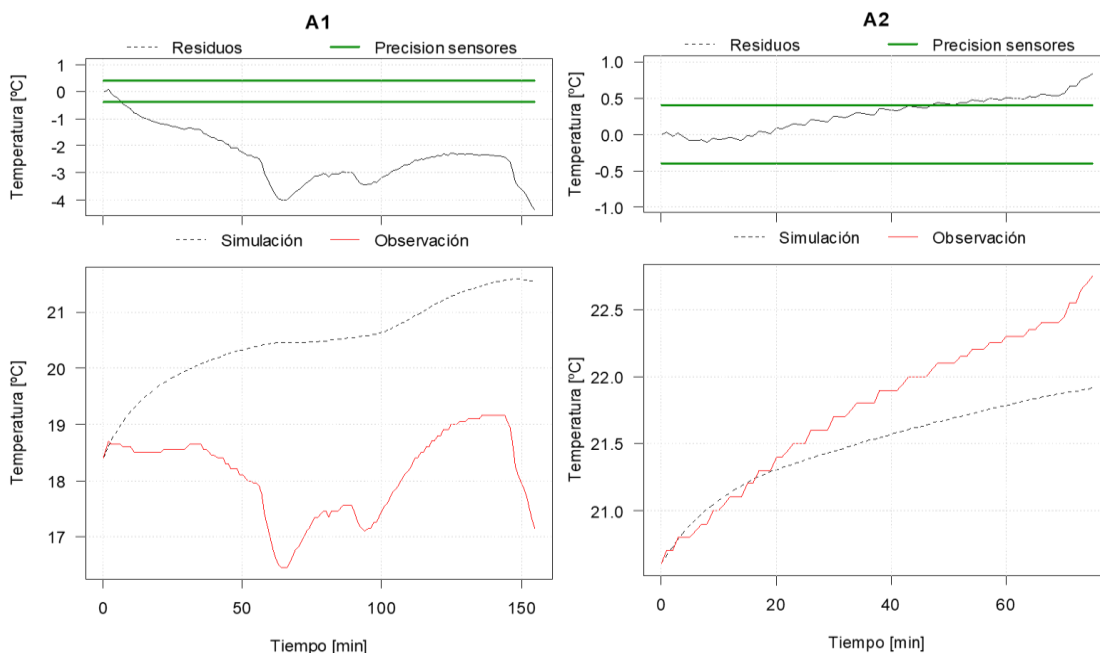


### 4.3. Aplicación de los modelos

Tras comprobar la idoneidad estadística de los modelos (apartado 4.1 y 4.3), se procede a la comprobar parámetros de los modelos desarrollados pueden aplicarse a otras condiciones, es decir, utilizando variables de entrada de otros periodos de monitorización. A tal efecto, se han utilizado los datos del 30 de noviembre y del 1 de diciembre para el modelo térmico y el de CO<sub>2</sub> respectivamente (apartado 3).

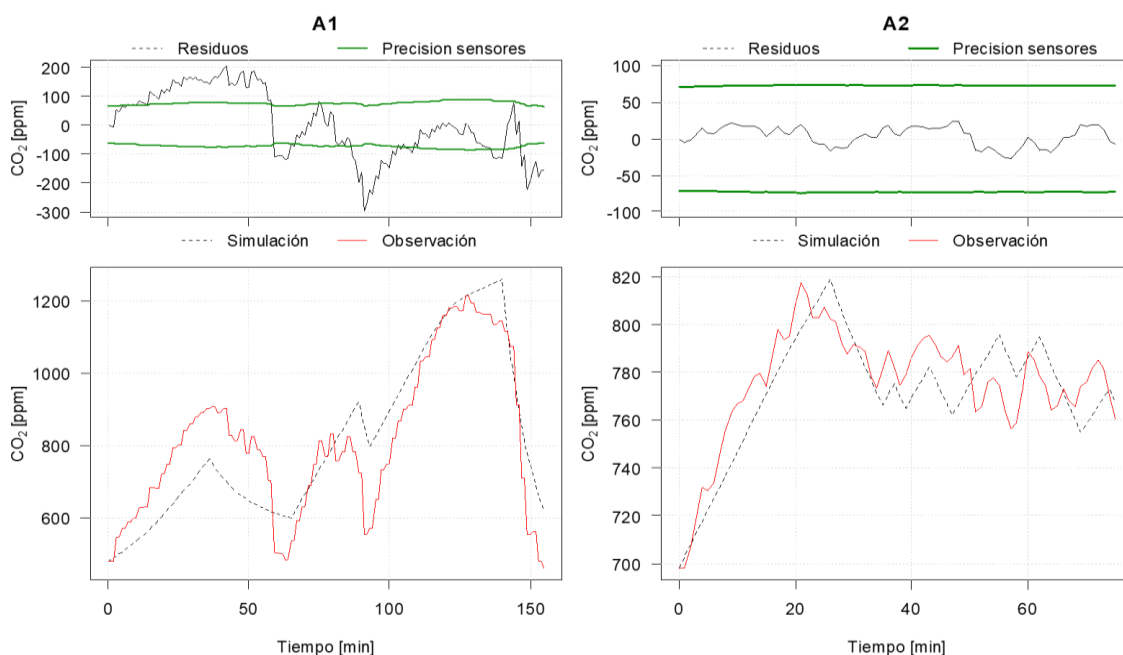
En la figura 6 se muestran los resultados de aplicar el modelo térmico a partir de nuevos datos. En el caso del aula A1, la que tiene ventilación natural, observamos que el modelo no ajusta correctamente la evolución de la temperatura. Esto puede deberse a que, en las condiciones climáticas del periodo, la generación del calor media del sistema de calefacción fuera menor que la estimada. Sin embargo, para el aula A2 se observa que la tendencia generada por el modelo es similar a la observación. Bien es cierto que al final del periodo ambas curvas se distancian unos 0.8°C, puede ser que el sistema de calefacción no actuara con la misma potencia.

**Figura 6: Aplicación del Modelo térmico en el aula A1 (izquierda) y A2 (derecha)**



La figura 7 muestra los resultados de aplicar el modelo de CO<sub>2</sub> a partir de nuevos datos. En el caso del aula A1, ventilación natural, el modelo sigue la tendencia de los valores observados, pero no acaba de ajustarse correctamente (desviación estándar de los residuos de 115 ppm). Esto puede deberse a que, en las condiciones climáticas del periodo, los flujos de ventilación cruzada del perdido eran muy variables (el 50% del periodo los errores se mantienen dentro del rango de precisión de los sensores). Sin embargo, para el aula A2, cuya ventilación mecánica es constante, el modelo y la observación coinciden a la perfección con una desviación estándar de los residuos de 13 ppm.

**Figura 7: Aplicación del Modelo de CO<sub>2</sub> en el aula A1 (izquierda) y A2 (derecha)**



## 5. Conclusiones

Los modelos reducidos mediante el modelaje de caja gris desarrollados, han logrado el objetivo principal del proyecto, simular la dinámica térmica y la concentración de dióxido de carbono en el interior de las aulas educativas de docencia superior.

Mediante el uso del lenguaje de programación de R y la librería CTSME, se han construido y validado los modelos. 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. El modelo de CO<sub>2</sub> 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 y la validación estadística adecuada de los parámetros desconocidos: características térmicas de la sala, calor y caudal exterior aportado para cada uno de los modelos, que se han supuesto constantes a lo largo del periodo.

Los resultados muestran que el modelo que más se asemeja a la realidad es el modelo de CO<sub>2</sub> con una desviación de los residuos de 115 ppm y 13 ppm para las distintas dos tipologías de ventilación (A1 y A2). Se observa que el error en el aula A1 es mayor puesto que la ventilación natural depende de las condiciones climáticas. Por otro lado, el modelo térmico, aun obteniendo resultados satisfactorios con los datos de estimación, la suposición de que estos son constantes independientemente del periodo no puede aplicarse. Los residuos obtenidos, nos indica que la dinámica interior de la temperatura está fuertemente influenciada por la situación climática del periodo, en especial aulas con ventilación natural.

Por esto, a partir de un nuevo proyecto, el IAQ4EDU, se estudiará la utilización de 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 es 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.

## 6. Referencias

- Azuma, K., Kagi, N., Yanagi, U., & Osawa, H. (2018). Effects of low-level inhalation exposure to carbon dioxide in indoor environments: A short review on human health and psychomotor performance. *Environment International*, 121, 51–56.
- Bacher, P., and Madsen, H. (2011). Identifying suitable models for the heat dynamics of buildings. *Energy and Buildings*, 43, 1511–1522.
- Brastein, O. M., Perera, D. W. U., Pfeifer, C., and Skeie, N. O. (2018). Parameter estimation for grey box models of building thermal behaviour. *Energy and Buildings*, 169, 58–68.
- CTSM-R Development Team (2021). Continuous time stochastic modeling in R. User's guide and reference manual. [Internet]. [Consultado 10 de enero 2021]. Disponible en: <https://ctsm.info/>.
- Gobierno de España. Real Decreto 486/1997, de 14 de abril, por el que se establecen las disposiciones mínimas de seguridad y salud en los lugares de trabajo. *Boletín Oficial del Estado*, 23 de abril de 1997, núm. 97.

Gobierno de España. Real Decreto 314/2006, de 17 de marzo, por el que se aprueba el Código Técnico de la Edificación. *Boletín Oficial del Estado*, 28 de marzo de 2006, núm. 74.

Gobierno de España. Real Decreto 1027/2007, de 20 de junio, por el que se aprueba el Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios. *Boletín Oficial del Estado*, 29 de agosto de 2007, núm. 207, pp. 35931-35984.

IREC. (2021). Proyecto ComMit-20. [Internet]. [Consultado 15 de octubre 2021]. Disponible en: <https://www.irec.cat/research/projects/commit20/>.

IDAE. Bienestar térmico en un espacio climatizado. [Internet]. [Consultado el 20 de noviembre del 2021]. Disponible en: <https://www.idae.es/articulos/bienestar-termico-en-un-espacio-climatizado>.

Li, Y., O'Neill, Z., Zhang, L., Chen, J., Im, P., and DeGraw, J. (2021). Grey box modeling and application for building energy simulations - A critical review. *Renewable and Sustainable Energy*, 146,111174.

Macarulla, M., Casals, M., Carnevali, M., Forcada, N., and Gangoellés, M. (2017). Modelling indoor air carbon dioxide concentration using grey box models. *Building and Environment*, 117, 146–153.

Organización Mundial de la Salud. (2020). *Transmisión del SARS-CoV-2: implicaciones para las precauciones de prevención de infecciones*. Obtenido el 1 de octubre de 2021 desde: <https://www.who.int/news-room/commentaries/detail/transmission-of-sars-cov-2-implications-for-infection-prevention-precautions>.

Universidad Politécnica de Catalunya. (2021). *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*. Disponible en: [https://www.upc.edu/es/sala-de-prensa/pdf/instruccion\\_rector\\_plan\\_contingencia\\_covid\\_curso2021\\_22\\_es.pdf](https://www.upc.edu/es/sala-de-prensa/pdf/instruccion_rector_plan_contingencia_covid_curso2021_22_es.pdf).

Ruiz de Alegría, A.; Marín, D.; Tugores, J.; Macarulla, M. and Canals Casals, L. (2022). Impacto de los requisitos de ventilación por el covid-19 sobre la temperatura y la calidad del aire en aulas universitarias. *AEIPRO. XXVI Congreso Internacional de Dirección e Ingeniería de Proyectos* (pp. 1760-1770). Terrassa, España.

### Comunicación alineada con los Objetivos de Desarrollo Sostenible

