

Informe

ESTUDIO DE EFICIENCIA ENERGÉTICA DEL EDIFICIO DEL MUSEO DE NAVARRA MEDIANTE SIMULACIÓN ENERGÉTICA

SAVIArquitectura. Universidad de Navarra

30 de junio de 2020
Mod. 28 de septiembre de 2020

INDICE

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETO
2. NORMATIVAS Y RECOMENDACIONES SOBRE LAS CONDICIONES AMBIENTALES INTERIORES EN MUSEOS
3. METODOLOGÍA
 - 3.1. CALIBRACION DEL EDIFICIO Y CREACION DE AÑO CLIMATICO 2019
 - 3.2. MEDIDAS DE MEJORA DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA
4. RESULTADOS
 - 4.1. CALIBRACION DEL MODELO
 - 4.2. APLICACIÓN DE MEDIDAS DE MEJORA DE EFICIENCIA ENERGÉTICA
5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES FINALES

REFERENCIAS

ANEXO

ESTUDIO DE EFICIENCIA ENERGÉTICA DEL EDIFICIO DEL MUSEO DE NAVARRA MEDIANTE SIMULACIÓN ENERGÉTICA

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETO

Como fruto del contrato entre Museo de Navarra (en adelante MN) y SAVIArquitectura de la Universidad de Navarra, para la “Estudio de eficiencia energética del edificio del Museo de Navarra mediante simulación energética”, se presenta este Informe, cuyo objeto es conocer cómo funciona higrotérmica y energéticamente el edificio del MN, y proponer medidas de mejora de la eficiencia energética del edificio para todo el año.

El objetivo final que persigue la propiedad con este estudio es que el edificio sea eficiente energéticamente en invierno y en verano, teniendo en cuenta el uso singular de un museo. En particular y por el tipo de edificio, se buscará que las condiciones higrotérmicas sean lo más estables posibles y se eviten los sobrecalentamientos que ya se están padeciendo cada verano (que pueden afectar a la conservación de las obras de arte), que haya una adecuada calidad del aire para los visitantes y para los trabajadores del museo (el edificio no cuenta con sistema mecánico de renovación de aire ni con refrigeración, salvo en el salón de actos y el taller de niños), valorando la idoneidad de diferentes actuaciones y medidas de baja demanda y consumo energético, que puedan cuantificarse mediante un modelo ajustado de simulación energética. Por último y como objetivo final, se pretende que estos trabajos sirvan de apoyo a la propiedad, para un futuro pliego de proyecto de reforma del Museo de Navarra. De este estudio queda excluida la capilla anexa, por su carácter histórico-artístico y por sus peculiares características espaciales e higrotérmicas, que requieren un estudio distinto.

El modelo calibrado del edificio, se basa en los trabajos anteriores de monitorización del año 2019, así como en los datos recogidos por el sistema de monitorización del edificio, que recogen valores de temperaturas y humedad relativa de varias salas del museo cada diez minutos.

Los objetivos específicos del presente informe son:

- Creación del año climático 2019 de Pamplona, para calibrar el modelo del edificio
- Calibración del modelo respecto al año climático 2019, en base a los datos de monitorización disponibles.
- Con el modelo del edificio ya calibrado, creación de un modelo base (M00), simulado con el año climático de la serie climática 1980-2010, suponiendo un uso normal del edificio.
- Simulación de distintos escenarios, con medidas de bajo coste, medidas de rehabilitación parciales, medidas de rehabilitación considerando las exigencias mínimas establecidas por el Código Técnico de la Edificación (CTE-2019) para obras de rehabilitación, y medidas de rehabilitación con los valores recomendados para edificios con objetivos nZEB (edificios de consumo casi nulo) del CTE-2019
- Análisis de los escenarios, en base a las demandas energéticas y a las condiciones ambientales interiores (temperatura y humedad relativa), así como a otros aspectos constructivos, de ejecución, conservación del patrimonio, etc.

Por ello, el presente informe consta de los siguientes apartados:

- Contexto y antecedentes: normativas y recomendaciones sobre condiciones ambientales interiores en museos, y datos resumen del museo con los que se ha modelado el edificio
- Metodología: años climáticos, calibración del modelo, medidas de mejora de la eficiencia energética del edificio MN, y del análisis de los resultados
- Resultados: calibración del modelo, medidas de mejora de la eficiencia energética del edificio MN, y del análisis de los resultados
- Conclusiones y recomendaciones finales

2. NORMATIVAS Y RECOMENDACIONES SOBRE LAS CONDICIONES AMBIENTALES INTERIORES EN MUSEOS

Por su relevancia en el presente estudio, se resumen brevemente algunas de las condiciones ambientales interiores requeridas para museos, y ya mencionadas en el informe de monitorización del edificio. Según el documento CP-0921 del Ministerio de Cultura español [1], éstas deben responder a los requerimientos de conservación de las colecciones y al bienestar de las personas (visitantes y trabajadores del MN), de modo que no se deben supeditar los requerimientos de conservación de los objetos a la comodidad de las personas, sino hacerlas compatibles. Distinguiremos en el Museo, entre aquellos espacios expositivos, con grandes exigencias en la conservación de la colección del MN, y los espacios de oficinas, donde no hay obra expuesta. Además, hay otros espacios con usos distintos y puntuales, como el salón de actos o el taller de didáctica. Los espacios más exigentes desde el punto de vista ambiental, y que requerirán un mayor consumo de energía, son los espacios expositivos de las colecciones.

El parámetro fundamental en la calidad del aire interior para la conservación de las obras de arte es la estabilidad de la **humedad relativa**. Los sistemas de acondicionamiento, parciales (fijos o portátiles) o centralizados, deberían garantizar (según CP-0921):

- para el **ciclo diario**, una **oscilación máxima de ± 5 -10%**.
- para las fluctuaciones estacionales, a lo largo del **ciclo anual**, las **oscilaciones no deben superar el 20%, dentro del rango de 30-70%**.

El otro parámetro fundamental es el de la **temperatura** interior. Los sistemas deben garantizar (según CP-0921):

- para el **ciclo diario**, **oscilación máxima de ± 2 -5°C**.
- para todo el año, que ésta se encuentre entre **17-27°C**.

Debe tenerse en cuenta, que los objetos expuestos y almacenados con materiales especialmente vulnerables o con un estado de conservación crítico que necesitan un control más restrictivo, deben colocarse en vitrinas o sub-contenedores apropiados, acondicionadas con las condiciones adecuadas a dichos objetos, con lo que no se considerarán en este estudio.

En base a bibliografía [2] [3], **los parámetros óptimos y típicos para la conservación de las colecciones expuestas**, y que se recomiendan en ASHRAE para la **exhibición de colecciones temporales o en préstamo** [4] son las siguientes:

- Temperatura: 21°C (+/-1°C)
- Humedad relativa: 50% (+/-5%)

ASHRAE [4] define las siguientes clases de especificaciones para el control de los requerimientos ambientales.

- Clase AA: no tiene riesgo para la mayoría de los objetos y pinturas (algunos metales y minerales pueden requerir ajustes distintos de HR)
- Clase A: tiene un pequeño riesgo mecánico para objetos altamente vulnerables, pero no para la mayoría de los objetos, pinturas, fotografías y libros
- Clase B: tiene un riesgo moderado para objetos altamente vulnerables, y un riesgo muy pequeño para la mayoría de las pinturas, y fotografías, y algunos objetos y libros
- Clase C: en la que sólo se previenen riesgos extremos graves
- Clase D: en la que sólo se previenen las humedades

En la tabla 1, se resumen las especificaciones para las tres primeras clases, que son de aplicación en la mayoría de los museos. Se consideran aceptables las temperaturas entre 15-25°C y humedad relativa del 50% (o la media histórica para las colecciones permanentes).

Tabla 1. Clases AA, A y B de ASHRAE para museos, galerías, archivos y bibliotecas, y especificaciones diarias y estacionales de T y HR [4]

		Oscilaciones diarias	Oscilaciones estacionales
AA.		±2°C	+5°C/-5°C
Sin riesgo (salvo algunos metales muy vulnerables)		±5% HR	±5% HR
A	As. Clase con ajustes estacionales y se limitan las oscilaciones diarias	±2°C	+5°C/-10°C
		±5% HR	±10% HR
Pequeño riesgo sólo para objetos, etc, muy vulnerables	Ad. Clase que permite mayores oscilaciones diarias, pero no se aplican ajustes estacionales de la HR	±2°C	+5°C/-10°C
		±10% HR	±10% HR
B		±5°C	+10°C (lím.
Riesgo moderado para objetos muy vulnerables, y riesgo muy pequeño para otros objetos, etc		±10% HR	Máx. 30°C) ±10% HR

Para los trabajadores del MN, las condiciones son mucho menos restrictivas. Los rangos de HR son muy amplios entre el 30-70%. Las temperaturas en invierno, en espacio calefactados se recomiendan con consignas entre 21-23°C, y para verano con sistemas de aire acondicionado, podemos considerar unas consignas de 25-27°C siguiendo CTE-HE1 [5]. De manera simplificada, podemos estimar para Pamplona, los sobrecalentamientos a partir de 27°C, y de 30°C como límite máximo.

Por otro lado, **la renovación de aire de los espacios** es fundamental para la salubridad de las personas. Aunque el Reglamento de las Instalaciones Térmicas en los Edificios, RITE [6] recomienda para edificios nuevos con uso de museo una calidad del aire IDA 2, con un caudal de $0,83 \text{ l/(s m}^2\text{)}$, se han considerado para la estimación de las medidas de simulación del museo, unas tasas más bajas, como se detallan en la Tabla 3. Estos caudales se basan en los establecido en la norma UNE EN 16798-1 [7], para edificios con distintas tasas de contaminantes. Hay que considerar que el MN, tiene unas alturas tipo de más de 4m, espacios muy amplios, y poca afluencia de personas, con lo que pueden considerarse como espacios de baja o muy baja contaminación. Según bibliografía, también puede suponerse la renovación de aire sólo durante el horario de apertura del MN, dado que la ventilación no se realiza en general para la conservación de las colecciones, sino para el bienestar de las personas, y además las fuentes “contaminantes”, son principalmente los visitantes.

Tabla 3. Estimación de tasas de ventilación (siguiendo Tabla B.7 de UNE EN 16798-1)

EN 16798, tabla B.7	Cat. III Tasa Vent. $\text{l/(s m}^2\text{)}$	Cat. III h^{-1} MN	Cat. II Tasa Vent. $\text{l/(s m}^2\text{)}$	Cat. II h^{-1} MN
Edificio “no poco contaminante”, LPB-3	0,8	0,72	1,4	1,26
Edificio “poco contaminante”, LPB-2	0,4	0,36	0,7	0,63
Edificio muy poco contaminante”, LPB-1	0,2	0,18	0,35	0,32

Aunque los sistemas se calculen con tasas de ventilación bajas (ren/hora), todos los sistemas de renovación de aire permiten el aumento del caudal en momentos puntuales de mayor afluencia de personas o necesidad de renovación de aire en general. Estos sistemas deben incorporar filtrado de contaminantes de aire, fundamentalmente PM2.5, PM10, SO₂, NO₂ y O₃. Debe tener capacidad de funcionamiento continuado las 24h del día, aunque sólo funcione en horario de apertura al público [2].

3. METODOLOGIA

En este apartado se describe la metodología seguida en este estudio: desde los años climáticos utilizados, la metodología para la calibración del modelo y los escenarios de simulación, así como para el análisis de los resultados.

3.1. AÑOS CLIMATICOS UTILIZADAS EN LAS SIMULACIONES ENERGÉTICAS

Para la calibración del modelo del edificio del MN, se ha creado ex profeso un archivo climático 2019 en Pamplona, con los datos horarios disponibles de la estación meteorológica del Gobierno de Navarra, que están disponibles on line en su web (meteonavarra.org). La estación está situada a apenas 200m del museo, en la zona del Arzobispado. Los datos climáticos que se utilizan para la creación del archivo climático son temperatura de bulbo seco, humedad relativa, velocidad y dirección del viento, radiación global, etc.

Para la definición de los modelos de simulación con los escenarios de rehabilitación del MN, se utiliza el archivo climático de Pamplona, de la serie climática 1980-2010 (IWECE2, de ASHRAE).

En la figura 2, se pueden comparar las condiciones de temperatura de bulbo seco y de humedad relativa de ambos archivos climáticos para Pamplona.

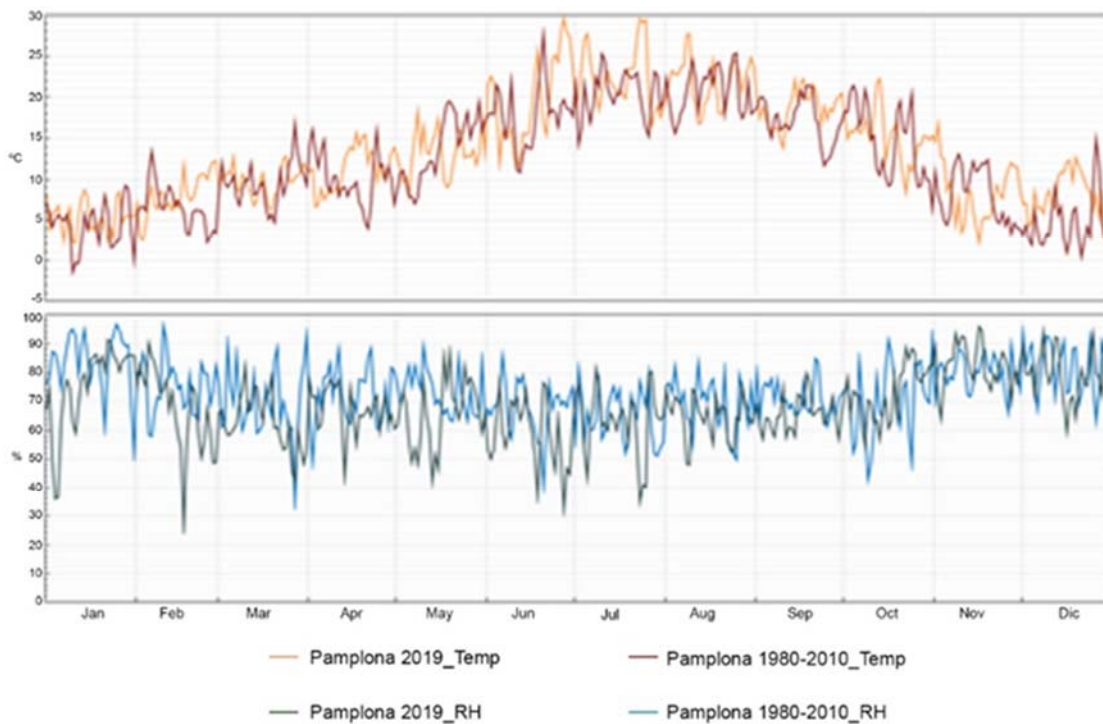


Figura 2. Comparación entre archivo climático creado de Pamplona 2019, y archivo de la serie climática 1980-2010 de Pamplona (IWECC2, de ASHRAE) (DView). Comparación de temperaturas (gráfico superior) y humedad relativa (gráfico inferior) media diaria

3.2. CALIBRACION DEL MODELO DEL EDIFICIO MN

En primer lugar, se procederá al ajuste y calibración del modelo energético del edificio con base en los datos históricos de monitorización que dispone la propiedad, y en los datos de monitorización recogidos en el año 2019 por SAVIArquitectura, tanto en invierno como en verano de 2019.

Para la simulación energética del estado actual del Museo de Navarra ha sido necesario el desarrollo de diferentes trabajos para la definición y calibración previa del modelo virtual base. La definición del modelo base implica la modelización virtual en volúmenes de la morfología básica del edificio objeto de estudio, la caracterización de los elementos constructivos y sistemas energéticos, así como la definición de los principales parámetros de uso y funcionamiento del edificio y del ambiente exterior con influencia en el comportamiento termodinámico del mismo.

Este modelo representa una réplica lo más aproximada posible del comportamiento termodinámico y energético del estado actual del edificio necesario como punto de partida en la construcción y análisis de los escenarios potenciales de rehabilitación. El objetivo de esta fase presupone la concordancia entre los datos energéticos y térmicos, reales y simulados de este modelo base dentro de unos límites estadísticos aceptados según metodologías internacionales.

El programa de simulación utilizado es Design Builder, que funciona con el motor de cálculo de Energy+, software ampliamente reconocido en trabajos de auditoría e investigación energética. Debido a que el objeto de los trabajos no es el diseño de los sistemas de las instalaciones de climatización, sino la estimación de la demanda energética de los mismos, se ha modelado y simulado el edificio con la opción de HVAC simple.

Definición del modelo base

Para una construcción ajustada de este modelo virtual se ha contrastado la información recogida en los planos con la información recogida en las diferentes inspecciones técnicas, ensayos constructivos y estudios precedentes. Se ha podido corregir y validar de esta forma la información gráfica disponible y recopilar de manera ordenada las especificaciones técnicas de los diferentes elementos constructivos del edificio.

De manera muy resumida, se describen a continuación los parámetros con los que se ha modelado el edificio del MN. El edificio consta de planta semisótano, planta baja, y cuatro plantas más, distinguiéndose entre el ala expositiva y el ala de oficinas. Para la calibración y para el análisis de las medidas de simulación, se han utilizado distintas salas representativas del museo, y que se detallan en la Figura 3. Se han elegido salas en distintas plantas y orientaciones, y también con distintos usos, fundamentalmente expositivos y oficinas.

Las fachadas del edificio son de ladrillo con distintos espesores y revestimientos en función de las plantas y las orientaciones. Los espesores para las zonas expositivas van desde los 97 cm de los muros exteriores de las plantas bajas hasta los 63 cm de la planta cuarta con transmitancias respectivas entre 0,62 y 0,92 W/m²°K. En la zona de oficinas, por el contrario, encontramos un espesor más homogéneo entre orientaciones y plantas de 0,58 cm, con una transmitancia aproximada de 0,95 W/m²°K.

En relación con las ventanas del museo se han estimado valores de transmitancia para vidrios dobles con cámara de aire (4-10-4) de 2,8 W/m²°K. Para las ventanas de la planta cuarta en la zona expositiva, teniendo en cuenta la reciente instalación de filtros solares, se han considerado vidrios con un factor solar del 15%. Teniendo en cuenta el estado de las carpinterías en las diferentes zonas del edificio y atendiendo a los resultados de los ensayos de puerta ventilador realizados se ha considerado una tasa de infiltración a 50Pa (n50) para oficinas de 6h⁻¹ y para las zonas expositivas de 2,5 h⁻¹.

Respecto a las cubiertas del edificio, encontramos 4 tipos principales según su ubicación y disposición: cubierta de teja con tablero Celetyp, cubierta plana con capa de cobertura de grava, otra con capa de cobertura de tierra vegetal, y una última cubierta transitable con pavimento de piedra. A pesar de no conocer su composición exacta, se han fijado los valores típicos de transmitancia térmica y composición identificados en los catálogos del CTE para esta época, con valores desde 1,8 a 2,6 W/m²°K, teniendo en cuenta la existencia de falsos techos.

Para el resto de elementos constructivos de los que se desconocía su composición exacta (suelos interiores, muros enterrados, muralla, etc), se han fijado valores aproximados en función de los espesores y los materiales visibles, y el sistema constructivo de la época.



Figura 3. Plantas del edificio del Museo de Navarra. En azul se indican las salas que se han utilizado como referencia, para la calibración y el análisis de resultados de los escenarios simulados

El edificio del MN tiene un sistema de calefacción con dos calderas de gasoil con radiadores tradicionales, y no tiene sistema de aire acondicionado más que en zonas concretas del museo y de las oficinas, junto con humidificadores/deshumidificadores y ventiladores puntuales. En la modelización base del MN no se han considerado los sistemas puntuales secundarios (humidificadores o sistemas de aire acondicionado) y se ha modelizado exclusivamente el sistema de calefacción principal por estar sujeto a una programación más estable y general del edificio.

Para la modelización del funcionamiento de la misma se ha analizado la evolución de las temperaturas interiores de las salas de referencia. Se han identificado los meses y periodos medios diarios de uso de la calefacción, así como las temperaturas medias máximas alcanzadas en cada una de ellas, indicadoras de las temperaturas medias de consigna reales para cada espacio. De esta forma se han fijado en el modelo unos periodos, horarios y consignas aproximadas a la influencia real de la calefacción en el edificio. Se define como programación de la calefacción de enero a mayo y de octubre a diciembre de 8:00 a 14:00h y de 16:00 a 19:00h para las zonas expositivas, y de 8:00 a 14:00h para las zonas de oficinas.

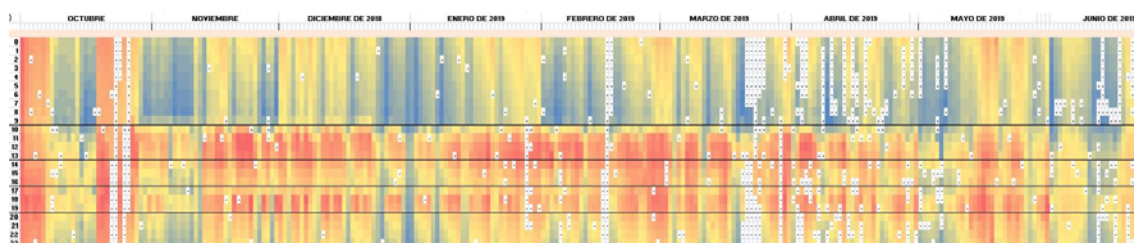


Figura 4. Mapa térmico anual de las temperaturas horarias diarias y anuales de la sala 1.8. En el eje y se distribuyen las temperaturas horarias y en el eje x las temperaturas diarias de todo el periodo 2019.

En relación con otros factores importantes influyentes en el balance termodinámico del museo, como las cargas internas de ocupación o iluminación, se han establecido unos criterios simplificados ajustados a la actividad y cargas de iluminación reales del edificio. Para las cargas internas por ocupación se ha considerado la visita media diaria anual y se ha establecido un valor distribuido por la superficie total expositiva. Se establece una ocupación media ajustada a los periodos de visita de 0,01 personas/m². Para las cargas de iluminación se considera un sistema de iluminación distribuido LED con una carga distribuida de 7,5 W/m².

Dada la complejidad morfológica del Museo de Navarra y la lógica de trabajo de los programas de simulación existentes, se han aplicado algunas simplificaciones y asunciones mínimas necesarias en base a los datos disponibles para un trabajo fluido en las fases posteriores con el modelo. Las desviaciones en las estimaciones con respecto al estado real se encuentran dentro de los rangos de error estadístico aceptados.

Una vez modelizados y caracterizados todos los volúmenes, elementos y configuraciones que conforman el modelo base se definen el resto de parámetros necesarios como son la ubicación, la orientación y las condiciones de contorno del edificio.

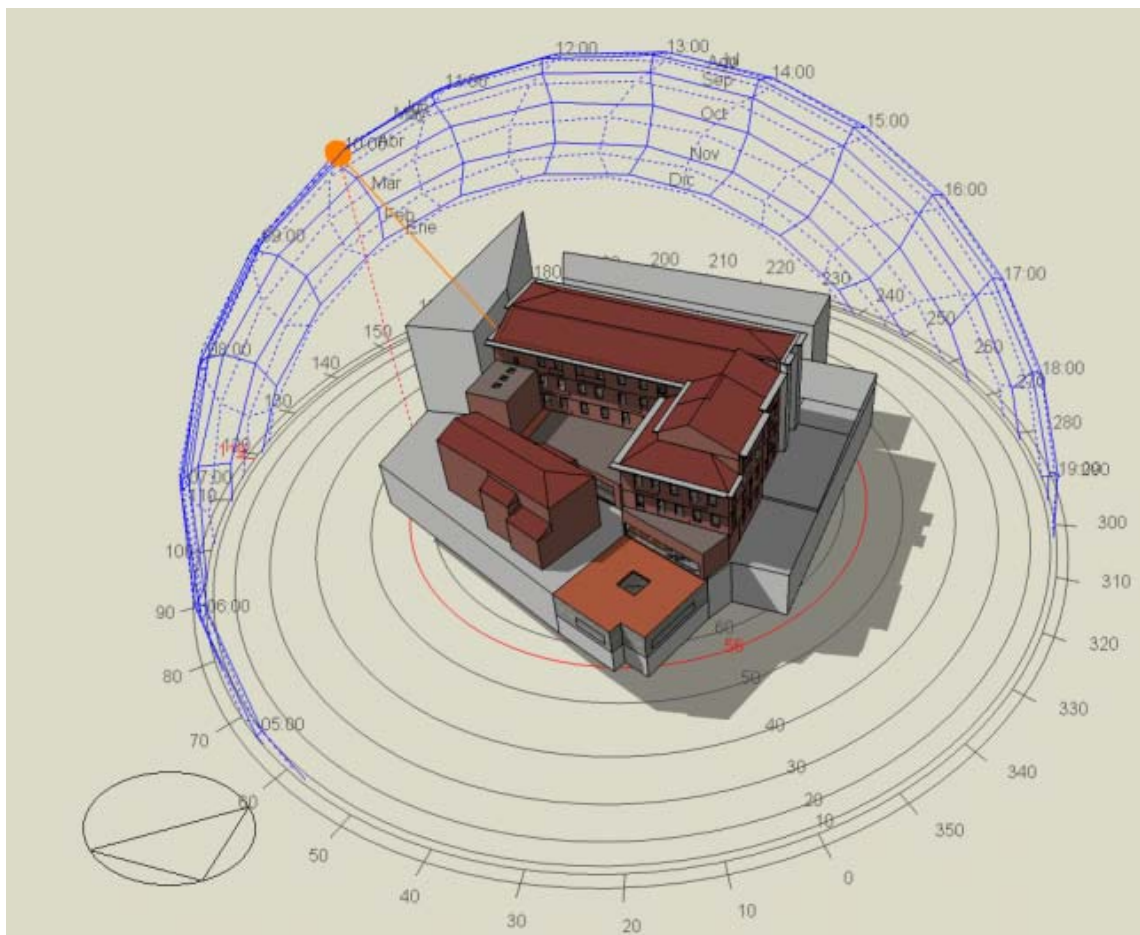


Figura 5. Modelo de simulación del edificio del Museo de Navarra en Design Builder, en relación con el diagrama solar

Calibración térmica y energética

Para la calibración del modelo base, se ha considerado seguir un proceso de *calibración manual basado en datos* siguiendo el *método de los modelos detallados*. Utilizando un modelo completo *basado en leyes mediante modelización directa* se utilizan los datos reales de monitorización como referencia en la modificación de los parámetros del sistema modelo. Con este método se puede conseguir la predicción más detallada del funcionamiento del edificio analizado.

Una vez definido el primer modelo *no calibrado* se ejecuta la primera simulación que sirve de punto de partida en el proceso de calibración. Para comprobar la idoneidad de los parámetros introducidos en el modelo (inputs) se evalúa la concordancia entre los datos reales y simulados de temperatura, humedad y consumos energéticos mediante tablas y gráficas comparativas de los espacios de referencia de las zonas expositivas y de oficinas. Como datos reales se han utilizado el consumo energético anual de calefacción facilitado por la propiedad, así como los resultados de monitorización de las condiciones térmicas del interior del edificio, tanto de SENSINET como de los estudios previos de monitorización realizados por este equipo.

Mediante sucesivas simulaciones de ajuste, una vez que los índices de error resultantes que evalúan las diferencias entre el estado real y simulado disminuyen hasta los límites aceptados, el modelo se considera calibrado. Para este trabajo se utilizan como referencia los indicadores definidos por la ASHRAE Guideline14 (**NMBE**, **CV(RMSE)** y **R²**), con los siguientes criterios de

calibración acorde a bibliografía (ver tabla 4) [8][9], para las temperaturas interiores de determinadas salas seleccionadas.

Tabla 4. Criterios de calibración de ASHRAE Guideline 14 [8], aplicados a las temperaturas interiores

Tipo de dato	Índice	Nomenclatura	ASHRAE Guideline 14
Criterios de Calibración			
A nivel horario (%)	NMBE	Normalized Mean Bias Error	± 10
	CV	Coefficient of Variation of the Root Mean Square Error	± 30
Ajuste modelo			
	R ²	Coefficient of determination	>75

Así mismo y como complemento a estos indicadores estadísticos se ha llevado a cabo un ajuste gráfico de los perfiles de temperatura y humedad relativa obtenidos (en niveles medios y oscilaciones diarias), teniendo en cuenta los exigentes requerimientos para las condiciones ambientales de un Museo aplicables al Museo de Navarra (nivel de oscilaciones y valores medios de temperatura y humedad relativa media).

En resumen, se ha calibrado el edificio en base a los datos disponibles del edificio, ajustando el consumo energético del modelo simulado al real con un error mínimo del 10% para el año 2019, y las temperaturas interiores con los índices de error estadísticos y las limitaciones de la tabla 4.

3.3. MEDIDAS DE MEJORA DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA DEL EDIFICIO MN

Con el modelo del edificio del Museo de Navarra calibrado, se procederá a la simulación energética de diferentes medidas y sus combinaciones que hagan que mejore la eficiencia energética del edificio, atendiendo a los condicionantes higrotérmicos específicos que requieren los espacios de un museo. Las diferentes medidas de mejora se han agrupado en:

- Medidas de bajo coste
- Medidas parciales de rehabilitación del edificio
- Medidas para cumplir la normativa CTE-HE2019 para rehabilitación de edificios
- Medidas para cumplir CTE-HE 2019 pero con objetivos más estrictos de consumo de energía casi nulo (nZEB)

Hay que tener en cuenta que la normativa CTE_HE1 excluye de su ámbito de aplicación “los edificios protegidos oficialmente por ser parte de un entorno declarado o en razón de su particular valor arquitectónico o histórico, en la medida en que el cumplimiento de determinadas exigencias básicas de eficiencia energética pudiese alterar de manera inaceptable su carácter o aspecto, siendo la autoridad que dicta la protección oficial quien determine los elementos inalterables”. Sin embargo, en este estudio se han planteado diferentes medidas para alcanzar como referencia las exigencias planteadas en esta normativa.

A continuación, se detallan las medidas a estudiar. Entre paréntesis, se indica la estación del año que se vería afectada por las medidas planteadas: INV (invierno), VER (verano), o ANUAL. Actualmente, la consigna tipo en el MN es de 22°C, aunque debido a la inadecuada regulación del sistema (para los estándares actuales), en algunas zonas las temperaturas alcanzan con la calefacción 24-25°C.

El taller de Didáctica y la Sala de actos sólo tienen un uso puntual, y la Capilla tiene unas condiciones higrotérmicas específicas, por lo que estos espacios no se consideran en el estudio pormenorizado de las condiciones térmicas y de HR del edificio.

De este modo, el modelo base **M00 (edificio en su estado actual)**, se simula respecto al modelo de la serie climática 1980-2010, y considera el museo en uso durante todo el año (calendario normal), con las instalaciones de calefacción y el uso tipo del edificio. Las medidas de mejora y rehabilitación implementadas se resumen en la tabla 5, y se explican a continuación.

3.3.1. Medidas de bajo coste

Estas primeras medidas, suponen bajar la consigna base del MN de 22°C a 20°C, pero conlleva una inversión en la mejora de la regulación del sistema de calefacción. La primera medida, contempla mejorar la regulación de cada circuito, ajustando o sustituyendo los sensores actuales, de modo que, en cada circuito, la consigna real sea de 20°C. La segunda medida, supone además mejorar la regulación general del sistema, de modo que permita una segunda consigna más baja, para evitar que la temperatura baje de 17°C, cosa que el sistema actual no permite. En oficinas se mantiene siempre una consigna de 21°C en horario de trabajo, y la calefacción apagada el resto del tiempo.

De este modo, las **medidas de bajo coste** a realizar en el modelo de simulación del edificio MN son las siguientes:

- **M01** (INV). Ajustar la calefacción a una consigna menor a la actual en las zonas expositivas (C.20°C), con algunas excepciones, y en oficinas 21°C (en horario de trabajo). Necesita inversión en el sistema de regulación
- **M02** (INV). Consignas de 20-17°C en zonas expositivas y 21°C en oficinas (en horario de trabajo). Necesita inversión en el sistema de regulación

3.3.2. Medidas parciales de rehabilitación

Partiendo de la medida M01, ajustando la consigna a C.20°C en zonas expositivas (es decir, asumiendo la mejora en la regulación de la calefacción supuesta en el escenario M01), se asumen medidas parciales que pueden acometerse con relativa facilidad sin tener que cerrar totalmente el Museo MN: sombreamiento de los huecos, renovación de ventanas, e instalaciones de sistemas de renovación del aire.

Aunque los huecos tienen unos estores interiores fundamentalmente de control lumínico, son necesarios **sistemas de sombreamientos** debido a los sobrecalentamientos detectados en verano. El sombreamiento se plantea por el exterior, por considerarse el más efectivo, y su colocación es especialmente relevante en las orientaciones este y oeste, aunque se han supuesto colocadas en todos los huecos del museo. Se plantean lamas de aluminio tipo venecianas de alta reflectancia, para ver el rango de efectividad de la medida, aunque no suponen ningún diseño en especial. En el proyecto de rehabilitación que se realice, se deben considerar las características de resistencia al viento y mantenimiento necesarias de estos sistemas. Todo el resto de medidas de este estudio, incorporan este diseño tipo de control solar durante las horas diurnas de verano (junio-septiembre).

La **renovación de todas las ventanas** del MN se plantea con carpintería de aluminio con rotura de puente térmico ($U=1,8 \text{ W/m}^2\text{K}$) y un vidrio doble bajo emisivo ($U=1,8 \text{ W/m}^2\text{K}$), que

mejoran los valores actuales de los huecos. Esta renovación de ventanas en todo el edificio, supone además una mejora de la estanqueidad al aire, y se ha supuesto un valor de $n_{50}=2,5h^{-1}$ en todo el edificio. Esta mejora se da en la zona de las oficinas, donde se realizó un ensayo de puerta ventilador con un resultado de $n_{50}=6h^{-1}$, debido al mal estado de muchas de las carpinterías actuales. En las zonas expositivas se había supuesto en el modelo base $n_{50}=2,5h^{-1}$, donde el estado de las ventanas es muy bueno porque apenas se abren (aunque no se pudo hacer el ensayo por razones de protección de las obras).

La **instalación de sistemas de renovación del aire** se plantea como una necesidad fundamental en el MN, debido a que, con los parámetros actuales de conservación de las colecciones, no se puede garantizar la integridad de las mismas mediante la apertura manual de las ventanas, tal y como estaba planteado en el proyecto de rehabilitación de los años 90. Al tener el MN alturas y espacios amplios, y pocos visitantes, se supone una primera estimación de renovación de aire de $0,18 h^{-1}$ (a presión normal) durante los horarios de apertura al público (ver apartado 2). La ventilación se supone con sistemas de recuperación de calor (RC), que permiten la introducción del aire atemperado y dan lugar a una menor demanda de calefacción. Se ha simulado funcionando todo el año en horario de apertura al público, de martes a domingo: 9-19h, con $0,18 h^{-1}$, y además en verano, de junio a septiembre, se ha supuesto *free cooling* de 0-8h de la mañana, con $1h^{-1}$.

Estos recuperadores pueden colocarse con elementos individuales por planta o por zona y empotrados en los muros, o con un sistema por zona o general para todo el edificio con conductos de aire.

En resumen, las **medidas parciales** a realizar en el modelo de simulación del edificio MN son las siguientes:

- **M11** (VER). Instalación de sistemas de sombreado en huecos por el exterior
- **M12** (ANUAL). Renovación de ventanas ($U=1,8$, CTE-Reh), con sombreado M11
- **M13** (INV). M12 + Doble consigna $20^{\circ}C$ - $17^{\circ}C$ en zonas expositivas, y $21^{\circ}C$ en oficinas
- **M14** (ANUAL). M13 + renovación de aire con RC, Caudal tipo $0,18 h^{-1}$

3.3.3. Medidas de rehabilitación para cumplir normativa española CTE2019

Para este conjunto de medidas de rehabilitación, se ha considerado el cumplimiento de los Valores límite máximos de la tabla 3.1.1 del CTE-HE1 de acuerdo a la zona climática D1 de Pamplona: para fachadas $U=0,41 W/m^2K$; para cubiertas $U=0,35 W/m^2K$; y para huecos $U=1,8 W/m^2K$. Siempre hay que considerar que el cumplimiento de estas exigencias no debe alterar el carácter o aspecto arquitectónico o histórico protegido. Básicamente se han considerado dos conjuntos de medidas, una aislando por el interior de la envolvente térmica original del edificio, y otra por el exterior.

La **renovación de la envolvente por el INTERIOR-1**, consiste en una rehabilitación por la cara interior de la envolvente térmica del edificio, de modo que los muros más desfavorables cumplan como mínimo los valores exigidos. No altera la imagen general exterior del edificio, y el ladrillo original exterior sigue visto:

- Fachadas, con U mínima de $0,41 W/m^2K$ en el muro más desfavorable, por lo que se ha supuesto un trasdosado general interior de 5cm de lana de roca (MW) y doble panel de yeso laminado.

- Huecos: iguales a los vistos en M12 ($U=1,8 \text{ W/m}^2\text{°K}$ en vidrios y carpinterías de aluminio con rotura de puente térmico) con sombreamiento por el exterior.
- Cubiertas, con U mínima de $0,35 \text{ W/m}^2\text{°K}$, con aislamiento de 10cm de poliestireno extruido (XPS) sobre el soporte de cobertura, retejando y constituyendo una cubierta ventilada en las cubiertas inclinadas, y colocando dicho aislamiento sobre la impermeabilización y bajo la capa de grava o tierra, en las cubiertas planas.
- Estanqueidad al aire tipo del edificio: $n_{50}=2,5\text{h}^{-1}$ (en zonas expositivas y en oficinas).
- Puentes térmicos: se estima una reducción de los relativos a las hornacinas, encuentros, etc., pero no es posible reducir de manera sencilla con esta solución el de los frentes de forjado, aleros y balcones, etc.

La renovación de la envolvente por el EXTERIOR-1, consiste en una rehabilitación por la cara exterior de la envolvente térmica del edificio, modificando la imagen de la fachada:

- Fachadas, con U mínima de $0,41 \text{ W/m}^2\text{°K}$ en el muro más desfavorable, por lo que se ha supuesto una fachada ventilada con un aislamiento exterior de 5cm de lana de roca (MW) con capa exterior impermeable al agua y permeable al vapor de agua, cámara de aire ventilada, y piezas cerámicas.
- Huecos: iguales a los vistos en M12 ($U=1,8 \text{ W/m}^2\text{°K}$ en vidrios y carpinterías de aluminio con rotura de puente térmico) con sombreamiento.
- Cubiertas, con U mínima de $0,35 \text{ W/m}^2\text{°K}$, con aislamiento de 10cm de poliestireno extruido sobre el soporte de cobertura, colocando la teja con doble enrastrelado y cámara de aire para realizar una cubierta ventilada en las cubiertas inclinadas, y colocando dicho aislamiento sobre la impermeabilización y bajo la capa de grava o tierra, en las cubiertas planas.
- Estanqueidad al aire tipo del edificio: $n_{50}=2,5\text{h}^{-1}$ (en zonas expositivas y en oficinas)
- Puentes térmicos: se pueden reducir con efectividad todos los puentes térmicos de la envolvente.

En relación con las **instalaciones**, en las medidas M25 y M26 se propone la instalación en el edificio de sistemas completos de climatización, mediante UTAS con bombas de calor y enfriadoras, recuperadores de calor, y con calderas de gas natural para calefacción, considerando un sistema por aire, y con una regulación que permita el control de la temperatura y de la HR interior para la conservación de las colecciones. El diseño del proyecto de las instalaciones que se considere para la rehabilitación del MN, puede considerar otros sistemas como la calefacción por suelo radiante, que se considera muy adecuado para un museo¹. También podría utilizarse como suelo “refrescante” en verano, pero no se recomienda porque hay que controlar muy bien que no haya problemas de condensaciones.

Se establecen los siguientes rangos para las zonas expositivas, siguiendo otros estudios que tienen en cuenta la adaptabilidad a las condiciones exteriores también en las colecciones, con el objetivo de ajustar los consumos energéticos y hacer posible el uso de los sistemas, del siguiente modo:

- Temperatura. Consigna baja: 20°C (invierno); consigna alta: 25°C (verano)
- Humedad relativa: 40-60%, todo el año

¹ Como estas medidas no han considerado el diseño particular de las instalaciones, que puede ser muy variado, se ha realizado con una opción simplificada de sistemas HVAC, que no admite para este escenario la consideración de un suelo radiante, sólo un sistema convectivo por aire.

- Renovación de aire $0,18 \text{ h}^{-1}$ (a presión normal), de 8-19h todo el año (*free cooling* en verano con 1 h^{-1})

En la zona de oficinas, no se necesita un control tan estricto de las condiciones ambientales, como ya se ha comentado, por lo que se considera 21°C durante el horario de trabajo, y el resto del tiempo apagado, como en los escenarios anteriores:

En resumen, las **medidas de rehabilitación para cumplir la normativa española CTE2019 rehabilitación** para aplicar en el modelo de simulación del edificio MN, son las siguientes:

- M21 (ANUAL). Renovación de envolvente térmica INTERIOR-1, e instalación de sistemas de renovación de aire con RC ($20\text{-}17^{\circ}\text{C}$, y en oficinas 21-off)
- M22 (ANUAL). Renovación de envolvente térmica EXTERIOR-1, e instalación de sistemas de renovación de aire con RC ($20\text{-}17^{\circ}\text{C}$, y en oficinas 21-off)
- M23 (ANUAL). Renovación de envolvente térmica M21-INTERIOR-1, y renovación del sistema de calefacción (gas natural) y ventilación con RC (aire) ($20\text{-}17^{\circ}\text{C}$, y en oficinas 21°C -off)
- M24 (ANUAL). Renovación de envolvente térmica M22-EXTERIOR-1, y renovación del sistema de calefacción (gas natural) y ventilación con RC (aire) ($20\text{-}17^{\circ}\text{C}$, y en oficinas 21°C -off)
- M25 (ANUAL). Renovación de envolvente térmica M21-INTERIOR-1, y renovación del sistema de calefacción, ventilación con RC, y Aire acondicionado, AC, considerando sistemas de aire (con control de T y HR)
- M26 (ANUAL). Renovación de envolvente térmica M22-EXTERIOR-1, y renovación del sistema de calefacción, ventilación con RC, y Aire acondicionado, AC, considerando sistemas de aire (con control de T y HR)

3.3.4. Medidas de rehabilitación para cumplir objetivos CTE2019-nZEB

Para Pamplona, zona climática D1, en rehabilitación u obra nueva con criterios nZEB del CTE, se pueden tomar como referencia para los primeros análisis los valores orientativos de transmitancia térmica del anejo E, del CTE-HE1: para fachadas $U=0,27 \text{ W/m}^2\text{K}$; cubiertas $U=0,22 \text{ W/m}^2\text{K}$; huecos $U=1,6 \text{ W/m}^2\text{K}$, y suelo $U=0,48 \text{ W/m}^2\text{K}$. El cumplimiento de estas exigencias no debe alterar el carácter o aspecto arquitectónico o histórico protegido que se estime conveniente. Se ha supuesto una mejora de las infiltraciones del edificio alcanzando valores de $n50=1 \text{ h}^{-1}$, límite exigido en la certificado *Enerphit* de *Passivhaus* para rehabilitaciones.

Los modelos M31 y M32 se han realizado con aislamientos por el interior y por el exterior, respectivamente. Ambos suponen un control de la temperatura y de la HR interior de las zonas expositivas mediante sistemas con una mayor eficiencia que el conjunto de medidas anterior. El sistema de aire mediante UTAS con humidificadores y deshumidificadores, con bombas de calor con sCOP 3, caldera de condensación de alta eficiencia de apoyo a la bomba de calor (gas natural), y recuperadores de calor $RC=0,9$ de eficiencia. Sin embargo, y como se ha considerado en el apartado anterior, el objeto de este estudio no es el diseño de las instalaciones que puede ser muy variado, por lo que se utiliza un sistema por aire, con un modo simplificado de los sistemas de instalaciones en el programa de simulación. Se establecen los siguientes rangos para las condiciones ambientales interiores:

- Temperatura. Consigna baja (invierno): 20°C (24h); y consigna alta (verano): 25°C (27°C en horario nocturno)
- Humedad relativa: 40-60%, todo el año

- Tasa de renovación de aire $0,18 \text{ h}^{-1}$, de 8-19h todo el año (*free cooling* en verano, 1 h^{-1})

Por último, sobre el modelo M32 (con aislamiento de la envolvente por el exterior) las medidas del modelo M33 suponen un control muy estricto de los sistemas HVAC sobre la temperatura y la HR interior, así como unas mayores tasas de ventilación, con los siguientes rangos:

- Temperatura. Consigna baja: 21°C (invierno); consigna alta: 22°C (verano)
- Humedad relativa: 45-55%, todo el año
- Tasa de renovación de aire $1,26 \text{ h}^{-1}$ (24h todo el año)

En resumen, las **medidas de rehabilitación para cumplir objetivos CTE2019-nZEB**, a realizar en el modelo de simulación del edificio MN son las siguientes:

- M31 (ANUAL). Renovación de envolvente térmica INTERIOR-2 con tratamiento de puentes térmicos y mejora de las infiltraciones, e instalación de UTAS (para calefacción y refrigeración) con ventilación por RC, y control de condiciones ambientales interiores
- M32 (ANUAL). Renovación de envolvente térmica EXTERIOR-2 con tratamiento de puentes térmicos y mejora de las infiltraciones, e instalación de UTAS (para calefacción y refrigeración) con ventilación por RC, y control de condiciones ambientales interiores
- M33 (ANUAL). Renovación de envolvente térmica EXTERIOR-2 con tratamiento de puentes térmicos y mejora de las infiltraciones, e instalación de UTAS (para calefacción y refrigeración) con ventilación por RC, y con un control estricto de las condiciones interiores de temperatura y humedad relativa

Tabla 5. Resumen de las características principales del modelo base y de los escenarios de rehabilitación

	M00	M01	M02	M11.1	M12	M13	M14	M21	M22	M23	M24	M25	M26	M31	M32	M33
Control de temperaturas INVIERNO	EX: 22°C (H) OF:22°C (H)	EX: 20°C (H) OF:21°C (H)	EX: 20°C-17°C mín (H) OF:21°C (H)	EX: 20°C (H) OF:21°C (H)	EX: 20°C (H) OF:21°C (H)	EX: 20°C-17°C mín (H) OF:21°C (H)	EX: 20°C-17°C mín (H) OF:21°C (H)	EX: 20°C-17°C mín (H) OF:21°C (H)	EX: 20°C-17°C mín (H) OF:21°C (H)	EX: 20°C-17°C mín (H) OF:21°C (H)	EX: 20°C-17°C mín (H) OF:21°C (H)	EX: 20°C-17°C mín (H) OF:21°C (H)	EX: 20°C-17°C mín (H) OF:21°C (H)	EX: 20°C (24h) OF:21°C (H)	EX: 20°C (24h) OF:21°C (H)	EX: 21°C OF:21°C (H)
Control de temperaturas VERANO	No											25°C (27°C)	25°C (27°C)	25°C (27°C)	25°C (27°C)	EX: 22°C OF: 25°C
Control de HR (hum/deshum.)	No											40-60%	40-60%	40-60%	40-60%	45-55%
Ventilación (renovación de aire, a presión normal)	No						RC: 9-19h; 0,18h ⁻¹ ; (verano de 1-8h;1h ⁻¹) Eficiencia.0,7	RC: 9-19h; 0,18h ⁻¹ ; (verano de 1-8h;1h ⁻¹) Eficiencia.0,7	RC: 9-19h; 0,18h ⁻¹ ; (verano de 1-8h;1h ⁻¹) Eficiencia.0,7	RC: 9-19h; 0,18h ⁻¹ ; (verano de 1-8h;1h ⁻¹) Eficiencia.0,7	RC: 9-19h; 0,18h ⁻¹ ; (verano de 1-8h;1h ⁻¹) Eficiencia.0,7	RC: 9-19h; 0,18h ⁻¹ ; (verano de 1-8h;1h ⁻¹) Eficiencia.0,7	RC: 9-19h; 0,18h ⁻¹ ; (verano de 1-8h;1h ⁻¹) Eficiencia.0,7	RC: 9-19h; 0,36h ⁻¹ ; (verano de 1-8h;1h ⁻¹) Eficiencia.0,92	RC: 9-19h; 0,36h ⁻¹ ; (verano de 1-8h;1h ⁻¹) Eficiencia.0,92	RC:24h; 1,26h ⁻¹ ; Eficiencia.0,92
Sombreamientos y control lumínico	Estores interiores			SPS exterior	SPS exterior	SPS exterior	SPS exterior	SPS exterior	SPS exterior	SPS exterior	SPS exterior	SPS exterior	SPS exterior	SPS exterior	SPS exterior	SPS exterior
Huecos	Vidrio (U=2,8)				Vidrio (U=1,8) Carp (U=1,8)	Vidrio (U=1,8) Carp (U=1,8)	Vidrio (U=1,8) Carp (U=1,8)	Vidrio (U=1,8) Carp (U=1,8)	Vidrio (U=1,8) Carp (U=1,8)	Vidrio (U=1,8) Carp (U=1,8)	Vidrio (U=1,8) Carp (U=1,8)	Vidrio (U=1,8) Carp (U=1,8)	Vidrio (U=1,8) Carp (U=1,8)	Vidrio (U=1,6) Carp (U=1,6)	Vidrio (U=1,6) Carp (U=1,6)	Vidrio (U=1,6) Carp (U=1,6)
Fachadas	Fabrica de ladrillo (U=0,62-0,95)							U min= 0,41 (MW 5cm, INTERIOR)	U min= 0,41 (MW 5cm, EXTERIOR)	U min= 0,41 (MW 5cm, INTERIOR)	U min= 0,41 (MW 5cm, EXTERIOR)	U min= 0,41 (MW 5cm, INTERIOR)	U min= 0,41 (MW 5cm, EXTERIOR)	U min= 0,27 (MW 10cm, INTERIOR)	U min= 0,27 (MW 10cm, EXTERIOR)	U min= 0,27 (MW 10cm, EXTERIOR)
Cubiertas	Inclinadas y planas (U=1,8-2,6)							U min= 0,35 (XPS 10cm)	U min= 0,35 (XPS 10cm)	U min= 0,35 (XPS 10cm)	U min= 0,35 (XPS 10cm)	U min= 0,35 (XPS 10cm)	U min= 0,35 (XPS 10cm)	U min= 0,22 (XPS 15cm)	U min= 0,22 (XPS 15cm)	U min= 0,22 (XPS 15cm)
Envolvente térmica (otros)														Suelos Umin=0,48 (XPS 5cm)	Suelos Umin=0,48 (XPS 5cm)	Suelos Umin=0,48 (XPS 5cm)
Infiltraciones (n50)	EX: 2,5h ⁻¹ OF: 6h ⁻¹		EX: 2,5h ⁻¹ OF: 6h ⁻¹	EX: 2,5h ⁻¹ OF: 6h ⁻¹	EX: 2,5h ⁻¹ OF: 2,5h ⁻¹	EX: 2,5h ⁻¹ OF: 2,5h ⁻¹	EX: 2,5h ⁻¹ OF: 2,5h ⁻¹	EX: 2,5h ⁻¹ OF: 2,5h ⁻¹	EX: 2,5h ⁻¹ OF: 2,5h ⁻¹	EX: 2,5h ⁻¹ OF: 2,5h ⁻¹	EX: 2,5h ⁻¹ OF: 2,5h ⁻¹	EX: 2,5h ⁻¹ OF: 2,5h ⁻¹	EX: 2,5h ⁻¹ OF: 2,5h ⁻¹	EX: 1h ⁻¹ OF: 1h ⁻¹	EX: 1h ⁻¹ OF: 1h ⁻¹	EX: 1h ⁻¹ OF: 1h ⁻¹
Puentes térmicos	Frentes de forjado, carpinterías, aleros y balcones.							Mejora de puentes térmicos-I	Mejora de puentes térmicos-E	Mejora de puentes térmicos-I	Mejora de puentes térmicos-E	Mejora de puentes térmicos-I	Mejora de puentes térmicos-E	Mejora de puentes térmicos-I2	Mejora de puentes térmicos-E2	Mejora de puentes térmicos-E2
Sistema de calefacción	Radiadores (1)	(2) G: regulación	(3) G: regulación	(2) G: regulación	(2) G: regulación	(3) G: regulación	(3) G: regulación	(3) G: regulación	(3) G: regulación	Nuevo CC: Aire (+suelo radiante)	Nuevo CC: Aire (+suelo radiante)	UTA: Aire (+suelo radiante)	UTA: Aire (+suelo radiante)	UTA: Aire (+suelo radiante)	UTA: Aire (+suelo radiante)	UTA: Aire (+suelo radiante)
Sistema de refrigeración	No											UTA: Aire	UTA: Aire	UTA: Aire	UTA: Aire	UTA: Aire
Generación y Fuentes de energía para Acondicionamiento	Fueloil							Fueloil Electricidad (RC)	Fueloil Electricidad (RC)	Gas natural Electricidad (RC)	Gas natural Electricidad (RC)	Gas natural (Cal) Electricidad (RC+Enf+BC)	Gas natural (Cal) Electricidad (RC+Enf+BC)	Electricidad (RC+Enf+BC) Apoyo GN	Electricidad (RC+Enf+BC) Apoyo GN	Electricidad (RC+Enf+BC) Apoyo GN
Observaciones: (1). La regulación original del sistema (por circuito y planta) no garantiza las temperaturas. Se han observado sobrecalentamientos en zonas por la falta de regulación en la calefacción (2) G: Inversión: Regulación de la calefacción por planta (3) G: Inversión: Mejora de la regulación por planta, y del sistema de modo que permita doble consigna Legenda: SPS: Sistema de protección solar; EX: Zonas expositivas; OF: Zona de oficinas; RC: Sistemas de Recuperador de calor; BC: bomba de calor sCOP mínimo 3 (aerotermia); GN: Gas natural																

3.4. METODOLOGIA PARA EL ANALISIS DE LOS RESULTADOS

Una vez realizadas las simulaciones energéticas, se ha procedido a analizar los resultados según dos puntos de vista: el comportamiento energético general del edificio, y el comportamiento térmico e higrotérmico de salas seleccionadas para su estudio. Del comportamiento energético general del edificio, se han sacado los siguientes resultados de cada uno de los escenarios simulados (M) para poder compararse con el escenario base (M00) y entre sí. Debido a las condiciones actuales del museo, los datos asociados a sistemas que no existen (refrigeración y ventilación, fundamentalmente) no pueden compararse con la situación actual, pero se puede valorar la incidencia que tendrá en el consumo energético total, una vez que se instalen. Los datos por edificio de cada escenario de rehabilitación, son los siguientes:

- Demanda de calefacción de MN (MWh)
- Demanda de calefacción de MN (kWh/m2 anual)
- Demanda de refrigeración de MN (MWh)
- Demanda de refrigeración de MN (kWh/m2 anual)
- Fuentes de energía (gasoil, gas natural, electricidad, y electricidadR, considerada como de fuente renovable – aerotermia-)
- Se asegura la renovación de aire (si/no)
- Se asegura que las temperaturas en verano no superan 27°C en el MN (CP-0921) (si/no)
- Se pueden controlar las oscilaciones de HR diarias en el MN (si/no)

La demanda del recuperador de calor es la parte que recupera para calentar o enfriar (el calor que aprovecha del aire que expulsa para calentar o enfriar el que entra), y se adjuntan los datos a modo informativo, para comprobar la eficiencia del sistema. No indica el consumo del recuperador, que es muy bajo.

Por otro lado, debido a la importancia que el control de las condiciones ambientales interiores tiene en la conservación de las colecciones, es importante ver como inciden los distintos escenarios en las mismas. Se han seleccionado las siguientes salas, situadas en distintas alturas y orientaciones del MN (ver Figura 3):

- Sala Mosaico, planta sótano (lucernario central)
- Sala didáctica, planta baja, elemento añadido de distintas características arquitectónicas, y con uso puntual
- Sala de exposiciones temporales, en planta baja (sin huecos)
- Vestíbulo de la sala de temporales y del museo en general, con una gran cristalera al este, y situado en planta baja
- Despacho 1D, en planta 1 del ala de oficinas, con ventanas en orientación sur, y con sistema portátil de aire acondicionado en verano (debido a los sobrecalentamientos)
- Sala 1.3, en planta primera del ala expositiva, y con huecos en orientación oeste
- Sala 1.8, en planta primera del ala expositiva, y con huecos en orientación este
- Sala 2.4, en planta segunda del ala expositiva, y con huecos en orientación oeste
- Sala 2.12, en planta segunda del ala expositiva, y con huecos en orientación este
- Restauración, en planta segunda del ala de oficinas, con huecos a sur y este
- Sala 3.5, en planta tercera del ala expositiva, y con huecos en orientación oeste
- Sala 3.7, en planta tercera del ala expositiva, y con huecos en orientación oeste
- Oficina norte 1, en planta tercera (con huecos en orientación norte)
- Sala 4.2, en planta cuarta del ala expositiva, y con huecos en orientación oeste

- Bajo cubierta del ala expositiva en Planta 4, actualmente utilizada como almacén, y que no está calefactada

De cada una de estas salas, se han sacado los siguientes resultados por época de calefacción (octubre a mayo) o de refrigeración (junio a septiembre), que se derivan de las limitaciones del Ministerio de Cultura de su documento CP-0921 (excepto la limitación de 30°C, que se considera en este estudio como máxima absoluta para el bienestar de las personas, para explicar el alcance de los sobrecalentamientos).

- OCTUBRE A MAYO
 - o % días con oscilaciones térmicas diarias en invierno superiores a 2%
 - o % días con oscilaciones térmicas diarias en invierno superiores a 5%
 - o % días que se supera el límite inferior mínimo de temperatura de 17°C
 - o % días con oscilaciones de HR diarias en invierno superiores a 5%
 - o % días con oscilaciones de HR diarias en invierno superiores a 10%
 - o % días que se supera el límite inferior mínimo de HR de 30%HR en el MN
- JUNIO A SEPTIEMBRE
 - o % días con oscilaciones térmicas diarias en verano superiores a 2%
 - o % días con oscilaciones térmicas diarias en verano superiores a 5%
 - o % días que se supera el límite máximo superior de temperatura de 27°C
 - o % días que se supera el límite máximo superior de temperatura de 30°C
 - o % días con oscilaciones de HR diarias en verano superiores a 5%
 - o % días con oscilaciones de HR diarias en verano superiores a 10%
 - o % días que se supera el límite superior máximo de HR de 70%HR en el MN
- ANUAL
 - o Oscilación HR estacional (límite recomendado 20%)

Para el cálculo del % de días por encima de las limitaciones, se ha considerado para las oscilaciones de temperatura, un margen de +0,2°C, y para las de humedad relativa, un margen de +0,5%.

Con cada medida, podemos analizar su incidencia en el consumo energético y su repercusión en las condiciones ambientales. De este modo, algunas medidas pueden reducir los consumos energéticos, pero aumentar alguna limitación de las condiciones ambientales, y otras medidas de control ambiental, pueden aumentar los consumos energéticos para hacer posibles rangos estrictos de oscilación térmica o de humedad relativa. El objetivo es que con una adecuada actuación en las envolventes y en las consideraciones necesarias para la ventilación y renovación de aire, se deriven los menores consumos energéticos y los porcentajes de las desviaciones en las limitaciones ambientales estacionales y anuales en las salas se aproximen a 0.

4. RESULTADOS

En este apartado se describe la calibración del modelo y los resultados de los modelos.

4.1. CALIBRACION DEL MODELO

Se presentan a continuación los resultados obtenidos en la calibración de consumos y condiciones térmicas del modelo base para el año climático 2019. Se especifican los resultados de los consumos energéticos totales anuales, de los índices de error definidos por la ASHRAE Guideline14 -NMBE, CV(RMSE) y R²- para cada espacio de referencia del modelo base definitivo,

así como los resultados del ajuste de las condiciones ambientales de una de las salas de referencia, a modo de ejemplo.

Calibración energética

Atendiendo a la calibración del modelo base según el nivel de consumo facilitado por la propiedad para el conjunto del Museo se obtiene que la desviación del consumo resultante simulado no supera el 10% de desviación con respecto a los datos reales. Los datos de superficie utilizados para el cálculo son aquellos referidos a la superficie útil acondicionada definida por el programa de simulación. En este consumo simulado se incluyen a su vez las particularidades en el uso de la calefacción del año 2019, en el que, por ejemplo, las plantas tercera y cuarta no fueron calefactadas durante un periodo de tiempo. Así mismo, para espacios con un uso discontinuo como el taller de didáctica o el auditorio los periodos de calefacción son ajustados a un mínimo de 2 horas al día durante todo el invierno sin considerar los periodos de calefacción particulares de eventos, conferencias y uso de estos espacios. Esta diferencia debida al uso puede justificar el menor consumo resultante del modelo.

Tabla 6. Consumo energético asociado a la calefacción real y simulada, correspondiente al año 2019

Escenario	Periodo	Litros	kWh	kWh/m ² año
REAL	AÑO 2019	32000	323840*	58,63**
SIMULADO	AÑO 2019	30085 ± 10%	304460*± 10%	55,13** ± 10%

*Factor de conversión de litros a kWh =10,12

**Superficie útil acondicionada = 5523 m²

Calibración de las condiciones térmicas interiores

En relación con la calibración de las series de temperatura horarias del periodo 2019 del modelo simulado base, los resultados obtenidos de los índices NMBE, CVMRSE y R2 de los espacios de referencia recogidos en la tabla 7 indican un adecuado ajuste de las mismas a los datos monitorizados reales. Todos los valores para cada espacio se encuentran por debajo del 0.1 en el caso de los índices NMBE y CVMRSE, y por encima del 0.75 en el caso del índice R2. Cabe señalar que el límite indicado en la tabla 4 para el índice de error CVMRSE se fija en este caso en un 10% de error ó 0.1, a diferencia del límite del 30% indicado en dicha tabla de la metodología para este indicador según establece la ASHRAE. Esta decisión viene respaldada por estudios que recomiendan estos valores más restrictivos en el caso de calibraciones mediante series de temperatura [9].

Tabla 7. Resultados de los índices de calibración para los espacios de referencia del Museo de Navarra

	Límites	Sala mosaico	Iglesia	Temporales	Sala 1.3	Sala 2.4	Oficinas Restauración	Sala 3.5	Sala 4.2
NMBE	<0.1	0,039	0,013	0,030	0,023	0,014	0,016	0,018	-0,019
CVMRSE	<0.1	0,068	0,068	0,062	0,058	0,048	0,058	0,051	0,049
R2	>0.75	0,838	0,965	0,788	0,888	0,862	0,924	0,937	0,959

Como ejemplo del ajuste obtenido entre las series de temperatura reales y simuladas se muestra en la Figura 6 la comparativa entre los resultados anuales de temperaturas reales y simuladas

interiores de la sala 3.5. Salvando las pequeñas diferencias observables, resultado de parámetros de regulación y ventilación no controlables, el comportamiento térmico y ambiental simulado del Museo se ajusta al comportamiento real con un error muy reducido. Este modelo base resultante nos permite desde este punto de calibración evaluar, no sólo el impacto en el consumo energético de diferentes escenarios de intervención futuros sino también las condiciones ambientales resultantes con una aproximación adecuada.

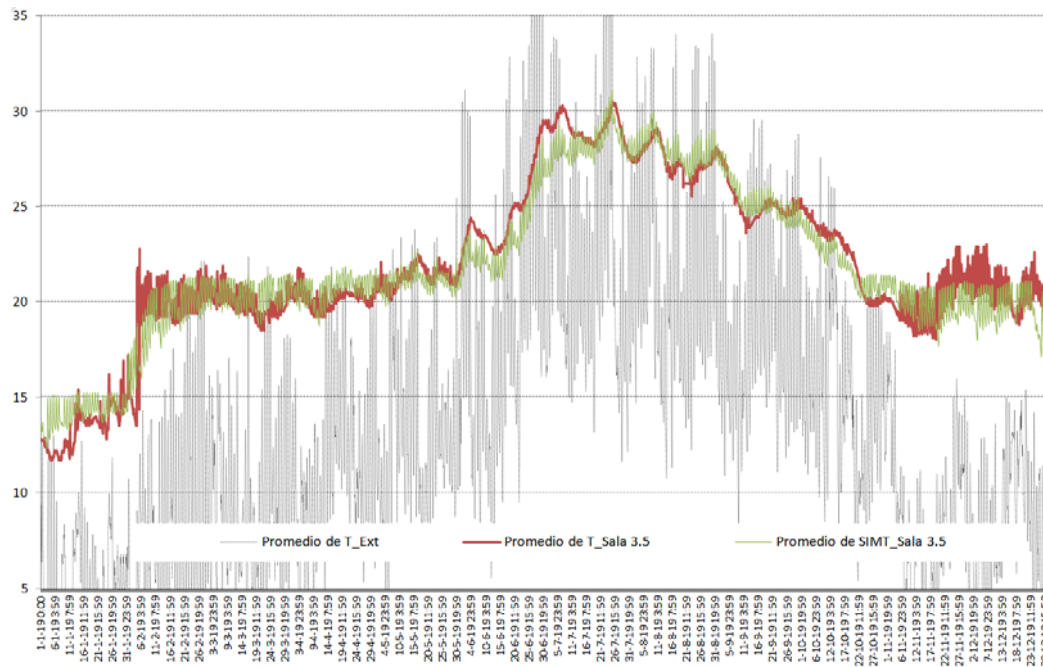


Figura 6. Ejemplo de ajuste de las temperaturas interiores entre el modelo real (en rojo) y el simulado (en verde)

Por último, conviene resaltar, que al igual que pasa en todos los modelos calibrados de los edificios, los sensores de temperatura no están situados en el centro de las estancias (resultado que proporciona el programa de simulación), sino colocado en las paredes del recinto. Los muros del MN con una alta inercia, contribuyen a que el valor medido por el sensor tenga unas oscilaciones mucho menores que las que se dan en el centro de las estancias. No obstante, y como se puede ver por los resultados de este apartado, el modelo ha quedado adecuadamente calibrado.

4.2. RESULTADOS DE LA APLICACIÓN DE MEDIDAS DE MEJORA DE EFICIENCIA ENERGÉTICA

A continuación, se analiza el impacto de los diferentes conjuntos de medidas respecto al modelo base. Se analizan los resultados en relación a los consumos energéticos y otras medidas generales (ver Tabla 8), y respecto a las condiciones ambientales interiores de las salas seleccionadas, y que se adjuntan en el Anexo.

Puede observarse que los resultados de simulación están ajustados al año climático tipo, por lo que son ligeramente distintos de los del año 2019, especialmente en lo relativo a las condiciones de verano, ya que en el verano de 2019 se dieron dos olas de calor.

Tabla 8. Tabla resumen de los principales resultados energéticos y de comportamiento del edificio, del modelo base y de los diferentes escenarios simulados

	M00	M01	M02	M11.1	M12	M13	M14	M21	M22	M23	M24	M25	M26	M31	M32	M33
Demanda de calefacción de MN (MWh)	347,37	324,97	379,39	327,2	307,05	319,74	237,23	136,14	129,98	119,65	114,31	180,69	183,08	99,03	98,68	269,32
Demanda de calefacción de MN (kWh/m² anual)	62,89	58,84	68,68	59,24	55,59	57,89	42,95	24,96	24,2	21,93	21,28	33,13	34,08	18,31	18,53	50,57
Demanda de refrigeración de MN (MWh)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	20,28	19,25	15,79	15,74	78,39
Demanda de refrigeración de MN (kWh/m² anual)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3,72	3,58	2,92	2,96	14,72
Total demanda de energía para acondicionamiento (MWh)	347,37	324,97	379,39	327,2	307,05	319,74	237,23	136,14	129,98	119,65	114,31	200,97	202,33	114,82	114,42	347,71
% de demanda de energía de acondicionamiento (MWh) con respecto a modelo base	BASE 100	93,6	109,2	94,2	88,4	92,0	68,3	39,2	37,4	34,4	32,9	57,9	58,2	33,1	32,9	100
Fuentes de energía, para la calef/refrig/climatización	Gasoil	Gasoil	Gasoil	Gasoil	Gasoil	Gasoil	Gasoil/ Elect	Gasoil/ Elect	Gasoil/ Elect	GN/ Elect	GN/ Elect	GN/ Elect.R	GN/ Elect.R	Elect.R/ (GN)	Elect.R/ (GN)	Elect.R/ (GN)
Se asegura renovación de aire interior	no	no	no	no	no	no	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI
Se asegura que las temperaturas en verano no superan 27°C	no	no	no	no	no	no	no	no	no	no	no	SI	SI	SI	SI	SI
Se pueden controlar las oscilaciones de HR diarias en el MN	no	no	no	no	no	no	no	no	no	no	no	SI	SI	SI	SI	SI
CONTROL TEMPERATURA (en zonas expositivas) INV: INVIERNO - V: VERANO	INV:22°C -	C:20- -9°C -	C:20- -9°C -	C:20- -9°C -	C:20- -9°C -	INV:20°C -	INV:20°C -	INV:20°C -	INV:20°C -	INV:20°C -	INV:20°C -	INV:20°C V:25(27)	INV:20°C V:25(27)	INV:20°C V:25(27)	INV:20°C V:25(27)	INV:21°C V:22°C
CONTROL HR (- significa que no hay control en HR)												40-60%	40-60%	40-60%	40-60%	45-55%
Tasa de ventilación (H, significa que funciona con horario)	-	-	-	-	-	-	0,18h ⁻¹ (H)	0,18h ⁻¹ (H)	0,18h ⁻¹ (H)	0,18h ⁻¹ (H)	0,18h ⁻¹ (H)	0,18h ⁻¹ (H)	0,18h ⁻¹ (H)	0,36h ⁻¹ (H)	0,36h ⁻¹ (H)	1,26h ⁻¹ (24h)

4.2.1. Medidas de bajo coste

La primera medida consistente en **ajustar las consignas de calefacción**, requiere una inversión en la mejora de la regulación de la calefacción del edificio, y se obtienen reducciones en la demanda energética de calefacción del 6%. Como las temperaturas máximas son menores, y la rehabilitación de la envolvente térmica del edificio no se ha considerado en esta medida, las temperaturas bajan en algunas salas y en algunos momentos por debajo de 17°C, a pesar de que la envolvente del MN tiene mucha inercia.

La segunda medida, que incorpora una segunda consigna a través de una inversión en la **regulación del sistema de calefacción**, supone un incremento del consumo del 9% (ya que actualmente cuando no hay visitas, la calefacción está apagada), pero asegura en general las temperaturas por encima de 17°C en todo el museo², y habiendo ajustado a su vez las temperaturas máximas en 20°C, las limitaciones de las oscilaciones de temperatura también se reducen ligeramente en algunas de las salas.

El impacto de las medidas sobre la oscilación de la HR es muy ligero.

Este tipo de medidas tienen un coste bajo, pero requieren de un seguimiento de las condiciones ambientales de HR, posible debido al sistema de monitorización existente en el MN.

4.2.2. Medidas parciales de rehabilitación

La primera medida de colocación de un **sistema de protección solar**, tiene un impacto claro en la reducción del % de días con temperaturas mayores de 27 y 30°C, de modo que no se dan en ningún día en muchas de las salas, o se reducen drásticamente, aunque no llegue a reducirse a cero en las salas más expuestas (más altas y en orientación oeste). Por lo tanto, esta medida se considera fundamental por su alto impacto como *medida pasiva* que reduce los sobrecalentamientos, o los futuros consumos energéticos de refrigeración si se instala el sistema, y, por lo tanto, se incluye en el resto de las combinaciones de medidas. Como contrapartida, la HR de algunas salas sube, pero muy ligeramente.

La sustitución de las **ventanas por otras más eficientes** (junto con el ajuste de consignas), hace que la demanda energética de calefacción se reduzca un 12%. Además, se reducen las oscilaciones térmicas en invierno y también en verano respecto a la medida anterior, y también las temperaturas mínimas de invierno y las máximas de verano. Las oscilaciones de HR no varían mucho respecto a los límites establecidos, aunque sí sube ligeramente la HR anual.

La combinación de medidas M13, que incorpora la consigna secundaria en calefacción, aumenta ligeramente las demandas energéticas (como en las medidas M02), pero mejora las condiciones térmicas.

Por último, y sobre las anteriores, las medidas M14 añaden un sistema de ventilación con recuperador de calor (RC), para asegurar la renovación de aire. La reducción de la demanda de calefacción normalizada supone una reducción del 32% respecto al caso base, aunque hay que tener en cuenta el consumo eléctrico de los RC en todo el ciclo anual, aunque se trata de elementos de bajo consumo energético. Debido a las características del museo, con alturas de 4m, grandes espacios y en general la poca afluencia de visitantes, el lugar puede considerarse como poco contaminado, y podemos considerar una renovación ajustada del aire en

² En algunas salas, la temperatura no alcanza los 17°C por poca diferencia, debido a la potencia estimada del sistema actual

renovaciones y en horario de funcionamiento, para asegurar la adecuada calidad interior, sin aumentar los consumos energéticos. La reducción de la demanda de calefacción, se debe fundamentalmente al sistema de RC incorporado al sistema de ventilación. La instalación de estos sistemas debe analizarse cuidadosamente, tanto si son sistemas individuales por sala/zona o centralizados, y especialmente si no se considera una rehabilitación global del edificio. Debe estudiarse la colocación de los equipos, de modo que no supongan un problema acústico. Las oscilaciones térmicas diarias en verano aumentan significativamente por la medida de la renovación nocturna que sirve para enfriar pasivamente la estancia, aunque son inferiores en general a 5°C.

4.2.3. Medidas de rehabilitación para cumplir normativa española CTE2019

Este paquete de medidas ya incorpora **medidas globales en la envolvente térmica del edificio**. Las primeras dos medidas no suponen el cambio del sistema de calefacción actual (sólo un ajuste en la regulación, ya comentado), y reducen la demanda energética en más de un 60% tanto si se aísla por el exterior como por el interior de la fachada existente. Aparecen consumos energéticos eléctricos de los recuperadores (elementos de bajo consumo). Se observa un aumento en las oscilaciones de HR debido a la estrategia de renovación nocturna en verano, que no parece adecuada para el museo, aunque haya servido para reducir las temperaturas en verano. En invierno, donde no se ha supuesto la renovación nocturna con *free cooling*, también se observa un aumento de las oscilaciones de HR.

Las siguientes medidas M23-24 sobre las anteriores, suponen la sustitución del sistema antiguo de calefacción de gasoil por otro de gas natural, más eficiente energéticamente, con menos emisiones, y que reducen la demanda energética en más de un 65%.

Por último, las medidas M25-26 suponen un cambio total en el acondicionamiento suponiendo una climatización por aire con UTAS, con un control de HR (40-60%), y con incorporación de refrigeración. En este escenario se han supuesto consigna baja de 20°C en invierno y consigna alta de 25°C en verano. Aun así, la calefacción supone una reducción de más del 45% respecto de la situación original, y aparecen consumos energéticos del RC asociados a la calefacción y a la refrigeración. La demanda energética de calefacción es de 33-34kWh/m²anual y el de refrigeración de alrededor de 3,5kWh/m²anual. En relación a la refrigeración, hay que tener en cuenta que se han considerado unas bombas de calor con sCOP de 3, por lo que puede considerarse su consumo energético renovable.

4.2.4. Medidas de rehabilitación para cumplir objetivos CTE2019-nZEB

Las medidas M31-32 suponen **envolventes de altas prestaciones**, con los límites recomendados para la zona climática, y con una reducción significativa de las infiltraciones a n50=1h⁻¹. También se ha cambiado el sistema a UTAS con suposición de bombas de calor de sCOP=3, y con un control de temperaturas de 20-25°C y 40-60% de HR, y una tasa de renovación de aire con horario de 0,36h⁻¹ (con *free cooling* en verano en horario nocturno). Las demandas energéticas asociadas a la calefacción se reducen a casi el 70% respecto al modelo original. La demanda energética de calefacción es de 18kWh/m² anual y el de refrigeración de alrededor de 2,9kWh/m²anual.

La última medida M33 supone la envolvente anterior M32 pero con un **riguroso control de las condiciones ambientales interiores**, tanto en temperatura como en humedad relativa (temperaturas de 20-21°C y HR de 45-55%), se ha suprimido el *free cooling* en verano, y se ha considerado una renovación constante de 1,26h⁻¹ las 24h del día. Conforme el control de las

condiciones ambientales interior es mayor, se pueden mejorar las condiciones ambientales conforme a los rangos que recomienda el Ministerio, aunque con un mayor consumo energético. En este caso, la demanda de calefacción es igual a la demanda original del modelo base, aunque con unas prestaciones muy superiores de control de temperatura y humedad relativa, y unas tasas de renovación de aire altas. La demanda de calefacción es de 50,6kWh/m² anual y la de refrigeración de alrededor de 14,7kWh/m² anual. La demanda de refrigeración ha subido significativamente, debido a las bajas consignas para condiciones de verano (21°C, cuando el anterior escenario era 25°C) y al control de la humedad relativa, así como la de calefacción debido a la renovación de aire (y a pesar de contar con recuperador de calor) y al control de la HR.

Obviamente, esta última medida es la que mejor se ajusta a las recomendaciones para la climatización de los museos que da el Ministerio, y ante circunstancias de mayores requerimientos de renovación de aire (como el COVID en el año 2020). Sin embargo, las oscilaciones diarias de HR recomendadas más estrictas, requieren todavía un mayor control en la mayoría de los casos.

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES FINALES

En el presente informe, se han descrito y analizado los resultados de simulación energética realizada en el edificio del Museo de Navarra. El modelo se ha calibrado con los datos monitorizados en Pamplona en el año 2019 (datos de la estación de Gobierno de Navarra), y las simulaciones se han realizado con el año tipo de la serie climática para Pamplona 1980-2010 de ASHRAE.

Se han analizado distintas medidas que se van implementando de manera progresiva, para ver el alcance y la repercusión de cada una de las medidas en la demanda energética, así como en las condiciones ambientales interiores de temperatura y humedad relativa, buscando una adecuada estabilidad térmica, pero principalmente de la HR, diaria y estacional. Las medidas implementadas en el MN han tenido distinta incidencia en la reducción del consumo energético, siendo el de menor consumo los de una envolvente térmica más exigente (estándar CTE para edificios nZEB) junto con sistemas de instalaciones más eficientes, asegurando al mismo tiempo el control de las condiciones ambientales con distintos rangos de exigencia.

Partiendo de que se trata de un edificio de carácter histórico de gran inercia, la **protección solar de los huecos** supone la primera medida a tener en cuenta debido a los sobrecalentamientos que se producen en el interior, y a la gran carga energética que supondría si tuviera un sistema de refrigeración. Esta se ha mostrado eficaz, colocada por el exterior, y es fundamental debido a las orientaciones principales del ala expositiva. También tiene una gran incidencia en la zona de oficinas, y su colocación puede reducir los sobrecalentamientos y la necesidad del uso de aire acondicionado (AA) que ya se están utilizando.

Las medidas de **rehabilitación de la envolvente térmica** que se han considerado, y que son necesarias para que la demanda energética sea muy baja, van desde el aislamiento de la fachada (ya sea por el interior o por el exterior de la misma), de la cubierta, de los suelos, la sustitución de las ventanas, la mejora de las infiltraciones de aire, y el tratamiento de los puentes térmicos. Las medidas de rehabilitación de la envolvente reducen la demanda energética de calefacción entre un 45% y un 70% respecto al modelo original, según la envolvente se haga con criterios de CTE-rehabilitación, o de CTE-Edificios nZEB.

El **aislamiento de la fachada por el interior**, conserva el aspecto actual de la fachada exterior, pero supone el cierre total o parcial del museo para su ejecución, requiere de un estudio específico de humedades de condensación intersticiales para evaluar la necesidad de colocación de un paravapor en la cara caliente del aislamiento (esto es especialmente relevante en un museo). Asimismo, requiere para el tratamiento de los puentes térmicos del frente de forjado, aislar todos los forjados en su cara inferior y superior, con la consecuente modificación de la escalera. Estos detalles son más importantes conforme la envolvente se aísla más y es más estanca, y el estudio de la solución detallada será imprescindible para asegurar su correcto funcionamiento. También hay que valorar la reducción del espacio interior y de la altura de cada planta.

El **aislamiento de la fachada por el exterior**, tiene el inconveniente de que, si la cara exterior de la fachada tiene valor arquitectónico o patrimonial, queda oculto, aunque puede estudiarse la adecuación estética de la intervención con diferentes soluciones. Los sistemas de fachada ventilada permiten un tratamiento óptimo de los puentes térmicos, permiten todo tipo de piezas y despieces de revestimientos cerámicos o de cualquier otro tipo, y al ejecutarse desde el exterior, puede incluso realizarse sin cerrar el museo

Las **ventanas** se han estimado con transmitancias bajas de $1'8$ y $1'6 \text{ W/m}^2\text{°K}$, según criterios de CTE, para rehabilitación y nZEB respectivamente. Sin embargo, con la tecnología actual, puede llegarse a valores de $0,7 \text{ W/m}^2\text{°K}$ con vidrios triples con tratamientos especiales. El adecuado equilibrio entre la transmitancia, el factor solar, y la transmisión luminosa, es imprescindible, atendiendo también a su aspecto estético.

La mejora de la **estanqueidad al aire**, especialmente en los encuentros de la fachada con los huecos, es muy eficiente en la reducción de los consumos energéticos. El mercado actual ya dispone de los necesarios productos para bandas y complementos para alcanzar valores bajos recomendados por estándares como el *Passivhaus*. En este estudio se ha estimado una mejora progresiva de los valores hasta un n50 de 1h^{-1} .

Debe estudiarse toda la envolvente térmica del edificio en su conjunto, de modo que también se aisle de manera eficiente los distintos tipos de **cubiertas** (generalmente por el exterior y con sistema ventilado en el caso de las inclinadas) y los **suelos** (generalmente en rehabilitación se hace por encima de la solera o forjado sanitario, debido a la dificultad de su ejecución).

La **renovación del aire**, en condiciones controladas, debe realizarse con sistemas de recuperación de calor para no introducir nuevas cargas térmicas de calefacción y refrigeración, y aumentar de este modo los consumos energéticos. Se ha estimado una tasa de renovación reducida en horario de apertura al público (basado en bibliografía), debido al volumen de las salas y la baja incidencia de visitantes, aunque estos sistemas deben de ser capaces de trabajar con mayores caudales en momentos de mayor necesidad. Esta renovación de aire, necesaria fundamentalmente para el bienestar de los trabajadores y visitantes, va en perjuicio de la requerida estabilidad higrotérmica, por lo que son en general necesarios sistemas completos de humidificación/deshumidificación para proporcionar oscilaciones térmicas y de HR bajas. En el último escenario se ha considerado una tasa más alta en horario constante, que puede requerirse en determinadas circunstancias, para comprobar su incidencia en la demanda energética.

El sistema actual de calefacción con dos calderas de gasoil, aunque está bien conservado, tiene ya 30 años, utiliza una energía con altas emisiones de CO₂ asociadas, y necesita modificar y optimizar su regulación. Hoy en día, hay **sistemas de mayor eficiencia energética**, que pueden trabajar a menores temperaturas. Se propone la utilización de UTAS (Unidades de tratamiento de aire, donde el aire se pueda controlar), que incorporen renovación de aire con recuperación de calor, y humidificadores/deshumidificadores. Para apoyar el sistema de calefacción y demandar menores caudales, sería apropiado un sistema de suelo radiante. La producción de frío-calor puede realizarse con bombas de calor aire-agua (aerotermia) y apoyada por calderas de condensación si la potencia del sistema lo necesita (por ejemplo, para calefacción). Las bombas de calor pueden tener sCOP mínimo de 3 (o incluso 4) para considerar la energía que lo suministra como renovable, debido a su alta eficiencia.

Para las exposiciones temporales (en préstamo), **las exigencias ambientales** son típicamente de 21°C/50%HR, pero para el resto de la colección permanente, pueden aplicarse distintos rangos de oscilaciones diarias o estacionales, según indicaciones del ministerio o normativa ASHRAE para acondicionamiento de museos. Por ejemplo, en este estudio, se han estudiado escenarios con temperaturas de 20-25°C (consignas diferentes para invierno y verano), con una humedad relativa 40-60%. Debido a esto, es de gran interés considerar en la exposición de las colecciones, el control de las condiciones ambientales según el tipo de objeto, material, nivel de conservación, etc. (es decir, su clase según el riesgo de deterioro), establecer zonificaciones térmicas con colecciones con las mismas exigencias, etc. Los objetos altamente vulnerables, que requieren un control muy estricto, deben estar en vitrinas o espacios acondicionados para su conservación.

En conclusión, si la envolvente térmica y los sistemas son altamente eficientes, se pueden ajustar los caudales de renovación de aire y hacer un seguimiento adecuado de las condiciones ambientales con un margen adaptado a las condiciones estacionales, los consumos energéticos serán mínimos, se podrá asegurar la integridad de las colecciones, y el bienestar de los visitantes y de los trabajadores del Museo de Navarra.

RECOMENDACIONES PARA EL PLIEGO DE CONDICIONES DEL PROYECTO DE REHABILITACION DEL EDIFICIO DEL MUSEO DE NAVARRA

Se presentan a continuación algunas recomendaciones para incorporar al Pliego de Condiciones Técnicas del futuro Proyecto de Rehabilitación del Museo de Navarra, en cuanto al comportamiento energético del edificio:

1. En la rehabilitación de la envolvente térmica y en el diseño de las instalaciones térmicas, se tendrán en cuenta las recomendaciones sobre condiciones ambientales interiores en museos, Según el CP-0921 del Ministerio de Cultura español:

- Para la humedad relativa interior:
 - o una oscilación máxima de ± 5 -10%, para el ciclo diario.
 - o las oscilaciones no deben superar el 20%, dentro del rango de 30-70%, para las fluctuaciones estacionales, a lo largo del ciclo anual.
- Para la temperatura interior:
 - o para el ciclo diario, oscilación máxima de ± 2 -5°C.

o para todo el año, que ésta se encuentre entre 17-27°C.

Asimismo, los parámetros óptimos para la conservación de las colecciones expuestas, necesarios por lo general en las exposiciones temporales, cuando se tienen instalados sistemas de acondicionamiento de aire, son los siguientes:

- Temperatura: 21°C (+/-1°C)
- Humedad relativa: 50% (+/-5%)

Sin embargo, puede acondicionarse el museo con rangos más amplios dentro de las márgenes del Ministerio o de la normativa ASHRAE para museos, según el tipo de objeto, material, nivel de conservación, etc. y asegurar la integridad de las colecciones. La selección de estos rangos de las condiciones ambientales interiores debe ser consensuada con el proyecto museístico y con la dirección del museo de navarra.

2. La rehabilitación de la envolvente térmica debe ser completa y ambiciosa, que incluya fachadas, cubiertas, huecos, y separación con el terreno o con espacios no calefactados. Se recomienda alcanzar estándares ambiciosos, al menos como el planteado en el CTE-HE para edificios nZEB de Consumo de energía casi nulo. Se atenderá especialmente a:

- La estanqueidad al aire: se recomiendan valores de $1h^{-1}$ (como el exigido en el estándar *Enerphit* de *Passivhaus*), que pueda comprobarse en salas seleccionadas mediante ensayo de puerta-ventilador (n50), siempre que exista ventilación controlada con recuperadores de calor. Para ello, debe tratarse cuidadosamente la línea de estanqueidad del edificio, y detallarse su resolución en los detalles constructivos
- La solución de los puentes térmicos: deberán aportarse valores y detalles de los mismos.

3. En cuanto al aislamiento de la fachada, se deberá hacer una justificación detallada de la solución de aislamiento térmico diseñada, ya sea por el exterior o por el interior de la fachada existente, estudiando la adecuación estética en relación al diseño global del edificio, estudio que justifique que no se producen humedades de condensación intersticiales, solución de los puentes térmicos tipo (con cálculo de puente térmico lineal), y las ventajas e inconvenientes del diseño elegido.

4. En relación con el sistema de protección solar de los huecos, se debe aportar un estudio de soleamiento de cada orientación de fachada y la adecuación del sistema elegido para una menor demanda de energía a lo largo de todo el año, especialmente para el verano.

5. En relación a las instalaciones de climatización, se realizará un estudio detallado de las soluciones idóneas para edificios nZEB con producción de energía renovable, y el control de temperatura y humedad relativa que exige un museo. Se aconseja:

- Unidades de Tratamiento de Aire (UTA), que incorporen ventilación controlada con recuperadores de calor de alta eficiencia, y humidificadores/deshumidificadores. Deben incorporar filtrado de contaminantes de aire, fundamentalmente PM2.5, PM10, SO₂, NO₂ y O₃.

- Para la producción de frío-calor, bombas de calor de sCOP mínimo 3 (aeroterminia). La producción de calor en invierno se podrá complementar si es preciso, con una caldera de condensación de gas natural de alta eficiencia.
- Posibilidad de instalación de suelo radiante para calefacción.
- Sistema de gestión y control de las condiciones ambientales interiores (temperatura, HR y CO₂), y monitorización de los consumos energéticos detallados del sistema, para un control de las condiciones ambientales, pero también sobre los costes económicos que supone el acondicionamiento del museo en cada momento.
- El caudal de la renovación de aire puede ajustarse de 0,8 l/(s m²) (RITE, edificios nuevos, IDA2), a valores más ajustados de 0,2 y 0,4 l/(s m²), debido al propio uso del sistema y la afluencia típica de visitantes, e incluso al horario de apertura al público. Sin embargo, el sistema debe diseñarse para poder trabajar con caudales de 0,8 l/(s m²), si se requiere en momentos puntuales.
- La ubicación de los sistemas requiere un espacio considerable, y su ubicación deberá estar cuidadosamente estudiada para funcionar eficientemente, y no ocasionar problemas acústicos al propio museo o al entorno urbanístico.

6. El proyecto de ejecución debería incluir una simulación energética detallada de la rehabilitación del edificio y de los sistemas de instalaciones de climatización diseñados, con al menos dos tipos de condiciones del control ambiental (T/HR), y se recogerán en una tabla los parámetros de simulación empleados en el cálculo.

7. La posible reorganización del funcionamiento del museo, además de atender a criterios museísticos, debe tener en cuenta una zonificación térmica que permita asegurar las mejoras condiciones térmicas y de humedad relativa, con el menor consumo energético.

Pamplona, 28 de septiembre de 2020.

SAVIArquitectura. Universidad de Navarra

REFERENCIAS

- [1] Instituto de Patrimonio Cultural Español. Dirección General de Bellas Artes y Bienes Culturales. Ministerio de Cultura, Normas de conservación preventiva para la implantación de sistemas de control de condiciones ambientales en museos, bibliotecas, archivos, monumentos y edificios históricos, (2009) 1–6.
- [2] R.P. Kramer, M.P.E. Maas, M.H.J. Martens, A.W.. van Schijndel, H.L. Schellen, Energy conservation in museums using different setpoint strategies: A case study for a state-of-the-art museum using building simulations, *Appl. Energy*. 158 (2015) 446–458.
- [3] R. Kramer, J. Van Schijndel, H. Schellen, Dynamic setpoint calculation including collection and comfort requirements: Energy impact for museums in Southern Europe, *Energy Procedia*. 133 (2017) 195–206. doi:10.1016/j.egypro.2017.09.384.
- [4] ASHRAE, Museums, libraries and archives. In: Owen MS, editor. ASHRAE Handbook. HVAC Appl. SI edition, Atlanta, (2011).
- [5] Ministerio de Fomento del Gobierno de España, Código técnico de la Edificación (CTE). Documento básico HE 1: Limitación de la demanda energética, (2019) 1–129.
- [6] Reglamento de las Instalaciones Térmicas En Los Edificios (RITE). Versión consolidada 2013, (n.d.).

- [7] UNE-EN 16798-1:2020. Energy performance of buildings. Ventilation for buildings. Part 1: Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and ac, (2020).
- [8] ASHRAE, ASHRAE GUIDELINE 14. Measurement of energy, demand, and water savings, (2014).
- [9] V.G. González, L.Á. Colmenares, J.F.L. Fidalgo, G.R. Ruiz, C.F. Bandera, Uncertainty's indices assessment for calibrated energy models, *Energies*. 12 (2019) 1–18. doi:10.3390/en12112096.

ANEXO

Tablas con el comportamiento de la temperatura y la humedad relativa por sala

En este anexo, se detalla el cumplimiento de las limitaciones de las condiciones ambientales, en los distintos escenarios propuestos de rehabilitación.

Estas tablas recogen los datos ambientales de salas de exposición con sistemas de climatización a excepción del espacio bajo-cubierta y del taller de restauración. El primero está simulado sin sistema de calefacción ni refrigeración (está en oscilación libre), pero hay que tener en cuenta que actualmente funciona como almacén de obras. No se ha simulado su adecuación, puesto que es previsible que en estos espacios se ubiquen distintas instalaciones.

El taller de restauración está simulado con las mismas condiciones de T/HR que el resto de las oficinas, pero sería deseable un acondicionamiento similar al que se da en las zonas expositivas, o la consideración de un cambio de ubicación en el edificio.

En las tablas se ha resaltado cuando se cumple la limitación (con un margen de un 5%), y cuando la oscilación estacional de humedad relativa es menor del 20%. Esta oscilación anual, a falta de criterios más claros, se ha calculado como la diferencia entre el promedio máximo y mínimo de todo el año para dicha sala.

Prehistoria y romano (sótano)

Respecto a CP-0921)	M00	M01	M02	M11	M12	M13	M14	M21	M22	M23	M24	M25	M26	M31	M32	M33
OCTUBRE A MAYO																
% días con oscilaciones térmicas diarias en invierno superiores a 2°C	37	41	38	40	41	38	42	42	42	37	37	0	0	0	0	0
% días con oscilaciones térmicas diarias en invierno superiores a 5°C	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
% días que se supera el límite inferior mínimo de temperatura de 17°C	72	58	23	58	58	24	25	22	22	25	25	0	0	0	0	0
% días con oscilaciones de HR diarias en invierno superiores a 5%	88	88	88	88	88	88	99	98	98	98	97	28	29	27	28	16
% días con oscilaciones de HR diarias en invierno superiores a 10%	40	40	38	40	40	38	71	66	67	58	58	8	8	6	7	0
% días que se supera el límite inferior mínimo de HR de 30%HR en el MN	14	16	22	16	16	22	29	29	29	23	23	0	0	0	0	0
JUNIO A SEPTIEMBRE																
% días con oscilaciones térmicas diarias en verano superiores a 2°C	16	16	16	15	15	15	28	40	41	40	41	30	30	30	30	0
% días con oscilaciones térmicas diarias en verano superiores a 5°C	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
% días que se supera el límite máximo superior de temperatura de 27°C	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
% días que se supera el límite máximo superior de temperatura de 30°C	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
% días con oscilaciones de HR diarias en verano superiores a 5%	89	89	89	89	89	89	85	96	95	96	96	64	65	67	64	79
% días con oscilaciones de HR diarias en verano superiores a 10%	59	59	59	60	60	60	59	69	67	69	68	32	31	34	33	0
% días que se supera el límite superior máximo de HR de 70%HR en el MN	21	21	21	25	25	25	21	30	30	30	30	0	0	0	0	0
ANUAL																
Oscilación HR estacional	20	21	23	22	22	24	23	25	25	23	25	20	16	15	15	7

Temporales (planta baja)

RESULTADOS DE LAS CONDICIONES DE TEMPERATURA Y HUMEDAD RELATIVA

Respecto a CP-0921)	M00	M01	M02	M11	M12	M13	M14	M21	M22	M23	M24	M25	M26	M31	M32	M33
OCTUBRE A MAYO																
% días con oscilaciones térmicas diarias en invierno superiores a 2°C	16	12	9	12	12	11	40	35	35	35	35	0	0	0	0	0
% días con oscilaciones térmicas diarias en invierno superiores a 5°C	0	0	0	0	0	0	3	1	0	1	0	0	0	0	0	0
% días que se supera el límite inferior mínimo de temperatura de 17°C	5	6	2	6	5	5	48	32	28	37	33	0	0	0	0	0
% días con oscilaciones de HR diarias en invierno superiores a 5%	80	81	81	82	81	81	96	94	94	95	95	30	30	30	31	16
% días con oscilaciones de HR diarias en invierno superiores a 10%	32	34	33	35	37	36	61	54	53	55	54	8	8	7	7	0
% días que se supera el límite inferior mínimo de HR de 30%HR en el MN	26	22	22	22	22	22	26	26	27	26	26	0	0	0	0	0
JUNIO A SEPTIEMBRE																
% días con oscilaciones térmicas diarias en verano superiores a 2°C	19	19	19	19	19	19	34	35	33	35	34	66	68	80	80	0
% días con oscilaciones térmicas diarias en verano superiores a 5°C	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
% días que se supera el límite máximo superior de temperatura de 27°C	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
% días que se supera el límite máximo superior de temperatura de 30°C	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
% días con oscilaciones de HR diarias en verano superiores a 5%	84	84	84	85	85	85	49	90	89	90	90	61	61	64	63	80
% días con oscilaciones de HR diarias en verano superiores a 10%	36	36	36	40	40	40	23	57	57	57	57	27	28	34	34	2
% días que se supera el límite superior máximo de HR de 70%HR en el MN	9	9	9	13	13	13	9	30	29	30	30	0	0	0	0	0
ANUAL																
Oscilación HR estacional	21	19	19	22	22	22	22	24	24	23	24	16	16	16	16	7

Sala 1.3 (planta 1, oeste)

RESULTADOS DE LAS CONDICIONES DE TEMPERATURA Y HUMEDAD RELATIVA

Respecto a CP-0921)	M00	M01	M02	M11	M12	M13	M14	M21	M22	M23	M24	M25	M26	M31	M32	M33
OCTUBRE A MAYO																
% días con oscilaciones térmicas diarias en invierno superiores a 2°C	19	18	17	11	9	8	35	25	23	26	25	0	0	0	0	0
% días con oscilaciones térmicas diarias en invierno superiores a 5°C	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
% días que se supera el límite inferior mínimo de temperatura de 17°C	2	3	2	2	2	1	11	6	6	8	6	0	0	0	0	0
% días con oscilaciones de HR diarias en invierno superiores a 5%	67	71	72	70	70	69	93	88	87	88	88	23	24	25	24	14
% días con oscilaciones de HR diarias en invierno superiores a 10%	17	19	18	17	19	18	52	41	40	40	39	6	6	6	7	0
% días que se supera el límite inferior mínimo de HR de 30%HR en el MN	35	28	29	28	29	29	30	32	32	30	31	0	0	0	0	0
JUNIO A SEPTIEMBRE																
% días con oscilaciones térmicas diarias en verano superiores a 2°C	44	44	44	3	0	0	79	78	74	78	75	66	62	76	75	0
% días con oscilaciones térmicas diarias en verano superiores a 5°C	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
% días que se supera el límite máximo superior de temperatura de 27°C	43	43	43	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
% días que se supera el límite máximo superior de temperatura de 30°C	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
% días con oscilaciones de HR diarias en verano superiores a 5%	76	76	76	77	76	76	16	98	97	98	98	70	69	73	73	87
% días con oscilaciones de HR diarias en verano superiores a 10%	31	31	31	34	31	31	6	71	70	71	70	35	35	40	39	0
% días que se supera el límite superior máximo de HR de 70%HR en el MN	0	0	0	6	5	5	0	33	33	33	34	0	0	0	0	0
ANUAL																
Oscilación HR estacional	16	15	15	19	19	19	23	25	25	24	25	15	16	15	15	6

Sala 1.8 (planta 1, este)

RESULTADOS DE LAS CONDICIONES DE TEMPERATURA Y HUMEDAD RELATIVA

Respecto a CP-0921)	M00	M01	M02	M11	M12	M13	M14	M21	M22	M23	M24	M25	M26	M31	M32	M33
OCTUBRE A MAYO																
% días con oscilaciones térmicas diarias en invierno superiores a 2°C	9	8	7	7	5	4	36	27	26	29	28	0	0	0	0	0
% días con oscilaciones térmicas diarias en invierno superiores a 5°C	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
% días que se supera el límite inferior mínimo de temperatura de 17°C	4	4	2	4	3	2	10	7	6	9	7	0	0	0	0	0
% días con oscilaciones de HR diarias en invierno superiores a 5%	67	70	69	69	70	69	93	90	89	91	90	24	25	25	26	15
% días con oscilaciones de HR diarias en invierno superiores a 10%	17	18	17	19	19	19	52	44	42	44	44	5	6	6	6	0
% días que se supera el límite inferior mínimo de HR de 30%HR en el MN	37	28	29	26	28	29	29	30	30	28	29	0	0	0	0	0
JUNIO A SEPTIEMBRE																
% días con oscilaciones térmicas diarias en verano superiores a 2°C	22	22	22	7	1	1	88	88	87	88	88	70	71	82	82	0
% días con oscilaciones térmicas diarias en verano superiores a 5°C	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
% días que se supera el límite máximo superior de temperatura de 27°C	16	16	16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
% días que se supera el límite máximo superior de temperatura de 30°C	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
% días con oscilaciones de HR diarias en verano superiores a 5%	78	78	78	80	80	80	23	98	97	98	98	70	70	72	73	86
% días con oscilaciones de HR diarias en verano superiores a 10%	30	31	31	34	34	34	10	79	76	79	77	38	36	40	39	1
% días que se supera el límite superior máximo de HR de 70%HR en el MN	0	0	0	7	7	7	0	34	36	34	36	0	0	0	0	0
ANUAL																
Oscilación HR estacional	18	17	17	20	20	20	24	25	25	24	25	16	16	15	15	6

Sala 2.4 (planta 2, oeste)

RESULTADOS DE LAS CONDICIONES DE TEMPERATURA Y HUMEDAD RELATIVA

Respecto a CP-0921)	M00	M01	M02	M11	M12	M13	M14	M21	M22	M23	M24	M25	M26	M31	M32	M33
OCTUBRE A MAYO																
% días con oscilaciones térmicas diarias en invierno superiores a 2°C	28	23	23	18	15	13	36	23	19	26	21	3	2	2	2	0
% días con oscilaciones térmicas diarias en invierno superiores a 5°C	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
% días que se supera el límite inferior mínimo de temperatura de 17°C	2	3	2	2	2	2	12	6	4	7	5	0	0	0	0	0
% días con oscilaciones de HR diarias en invierno superiores a 5%	68	74	73	72	70	69	93	86	86	87	85	25	24	23	22	16
% días con oscilaciones de HR diarias en invierno superiores a 10%	17	22	22	20	20	19	51	38	33	38	34	7	8	7	7	0
% días que se supera el límite inferior mínimo de HR de 30%HR en el MN	46	30	30	29	30	30	31	32	33	30	33	0	0	0	0	0
JUNIO A SEPTIEMBRE																
% días con oscilaciones térmicas diarias en verano superiores a 2°C	62	62	62	20	9	9	92	92	85	92	86	83	80	87	82	0
% días con oscilaciones térmicas diarias en verano superiores a 5°C	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
% días que se supera el límite máximo superior de temperatura de 27°C	62	62	62	7	7	7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
% días que se supera el límite máximo superior de temperatura de 30°C	7	7	7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
% días con oscilaciones de HR diarias en verano superiores a 5%	78	79	79	78	77	77	14	98	97	98	98	73	73	75	75	89
% días con oscilaciones de HR diarias en verano superiores a 10%	33	33	33	34	31	31	4	75	72	75	73	42	39	45	44	2
% días que se supera el límite superior máximo de HR de 70%HR en el MN	0	0	0	0	0	0	0	25	28	25	30	0	0	0	0	0
ANUAL																
Oscilación HR estacional	16	13	13	18	18	18	21	23	24	23	24	14	15	14	14	6

Sala 2.12 (planta 2, este)

RESULTADOS DE LAS CONDICIONES DE TEMPERATURA Y HUMEDAD RELATIVA

Respecto a CP-0921)	M00	M01	M02	M11	M12	M13	M14	M21	M22	M23	M24	M25	M26	M31	M32	M33
OCTUBRE A MAYO																
% días con oscilaciones térmicas diarias en invierno superiores a 2°C	5	3	2	3	2	2	35	24	23	28	28	0	0	0	0	0
% días con oscilaciones térmicas diarias en invierno superiores a 5°C	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
% días que se supera el límite inferior mínimo de temperatura de 17°C	5	5	2	5	5	2	12	6	5	10	9	0	0	0	0	0
% días con oscilaciones de HR diarias en invierno superiores a 5%	62	67	66	67	66	67	92	87	87	90	91	24	25	25	25	15
% días con oscilaciones de HR diarias en invierno superiores a 10%	14	18	17	18	19	17	50	38	37	44	43	6	6	6	6	0
% días que se supera el límite inferior mínimo de HR de 30%HR en el MN	41	28	29	27	28	30	28	29	29	28	28	0	0	0	0	0
JUNIO A SEPTIEMBRE																
% días con oscilaciones térmicas diarias en verano superiores a 2°C	0	0	0	0	0	0	86	84	81	84	82	70	68	81	80	0
% días con oscilaciones térmicas diarias en verano superiores a 5°C	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
% días que se supera el límite máximo superior de temperatura de 27°C	35	35	35	2	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
% días que se supera el límite máximo superior de temperatura de 30°C	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
% días con oscilaciones de HR diarias en verano superiores a 5%	75	75	75	77	77	77	17	98	97	98	98	72	71	73	74	89
% días con oscilaciones de HR diarias en verano superiores a 10%	27	27	27	30	30	30	6	72	72	72	73	38	37	42	41	2
% días que se supera el límite superior máximo de HR de 70%HR en el MN	0	0	0	1	1	1	0	28	32	28	32	0	0	0	0	0
ANUAL																
Oscilación HR estacional	17	15	15	19	19	19	22	23	24	23	23	15	15	14	15	6

Restauración (planta 2, sur y este)																
RESULTADOS DE LAS CONDICIONES DE TEMPERATURA Y HUMEDAD RELATIVA																
Respecto a CP-0921)	M00	M01	M02	M11	M12	M13	M14	M21	M22	M23	M24	M25	M26	M31	M32	M33
OCTUBRE A MAYO																
% días con oscilaciones térmicas diarias en invierno superiores a 2°C	44	44	44	43	42	42	42	43	42	43	43	43	42	37	32	46
% días con oscilaciones térmicas diarias en invierno superiores a 5°C	9	11	11	10	5	5	31	22	14	2	0	2	0	8	1	39
% días que se supera el límite inferior mínimo de temperatura de 17°C	67	69	70	70	45	45	79	68	51	72	57	68	51	35	26	86
% días con oscilaciones de HR diarias en invierno superiores a 5%	100	100	100	100	94	94	100	99	98	99	98	96	93	88	88	99
% días con oscilaciones de HR diarias en invierno superiores a 10%	69	70	70	69	52	51	85	76	69	70	65	56	54	42	39	77
% días que se supera el límite inferior mínimo de HR de 30%HR en el MN	21	21	21	21	25	25	33	35	35	13	19	4	9	12	15	9
JUNIO A SEPTIEMBRE																
% días con oscilaciones térmicas diarias en verano superiores a 2°C	69	69	69	57	20	20	87	89	82	89	83	86	84	87	84	81
% días con oscilaciones térmicas diarias en verano superiores a 5°C	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
% días que se supera el límite máximo superior de temperatura de 27°C	27	27	27	6	7	7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
% días que se supera el límite máximo superior de temperatura de 30°C	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
% días con oscilaciones de HR diarias en verano superiores a 5%	96	96	96	96	85	85	57	98	96	98	97	80	73	81	75	65
% días con oscilaciones de HR diarias en verano superiores a 10%	68	68	68	69	48	48	34	76	76	77	76	56	51	55	49	40
% días que se supera el límite superior máximo de HR de 70%HR en el MN	0	0	0	7	0	0	0	22	24	22	25	0	0	0	0	0
ANUAL																
Oscilación HR estacional	11	11	11	14	15	15	15	18	20	14	16	11	12	13	15	7

Sala 3.5 (planta 3, este)																
RESULTADOS DE LAS CONDICIONES DE TEMPERATURA Y HUMEDAD RELATIVA																
Respecto a CP-0921)	M00	M01	M02	M11	M12	M13	M14	M21	M22	M23	M24	M25	M26	M31	M32	M33
OCTUBRE A MAYO																
% días con oscilaciones térmicas diarias en invierno superiores a 2°C	35	25	31	19	16	14	38	28	26	0	0	0	0	0	0	0
% días con oscilaciones térmicas diarias en invierno superiores a 5°C	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
% días que se supera el límite inferior mínimo de temperatura de 17°C	11	6	9	6	4	2	16	8	7	63	66	0	0	0	0	0
% días con oscilaciones de HR diarias en invierno superiores a 5%	86	77	86	75	75	74	95	88	88	78	79	26	26	26	26	16
% días con oscilaciones de HR diarias en invierno superiores a 10%	31	22	32	23	21	21	55	41	40	33	33	7	7	6	6	0
% días que se supera el límite inferior mínimo de HR de 30%HR en el MN	34	26	26	26	26	28	30	30	30	5	5	0	0	0	0	0
JUNIO A SEPTIEMBRE																
% días con oscilaciones térmicas diarias en verano superiores a 2°C	17	55	25	25	12	12	91	92	91	5	2	75	70	83	79	0
% días con oscilaciones térmicas diarias en verano superiores a 5°C	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
% días que se supera el límite máximo superior de temperatura de 27°C	25	57	31	13	13	13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
% días que se supera el límite máximo superior de temperatura de 30°C	0	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
% días con oscilaciones de HR diarias en verano superiores a 5%	82	78	84	80	80	80	44	98	97	86	87	74	74	74	74	89
% días con oscilaciones de HR diarias en verano superiores a 10%	41	30	43	31	29	29	17	76	74	50	51	44	47	44	43	1
% días que se supera el límite superior máximo de HR de 70%HR en el MN	0	0	0	0	0	0	0	20	22	11	11	0	0	0	0	0
ANUAL																
Oscilación HR estacional	15	13	14	16	16	16	19	21	22	12	12	14	14	13	14	6

Sala 3.7 (planta 3, este)

RESULTADOS DE LAS CONDICIONES DE TEMPERATURA Y HUMEDAD RELATIVA

Respecto a CP-0921)	M00	M01	M02	M11	M12	M13	M14	M21	M22	M23	M24	M25	M26	M31	M32	M33
OCTUBRE A MAYO																
% días con oscilaciones térmicas diarias en invierno superiores a 2°C	33	31	31	28	23	22	42	37	40	0	0	0	0	0	0	0
% días con oscilaciones térmicas diarias en invierno superiores a 5°C	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
% días que se supera el límite inferior mínimo de temperatura de 17°C	12	23	9	23	18	7	20	11	12	63	66	0	0	0	0	0
% días con oscilaciones de HR diarias en invierno superiores a 5%	82	85	86	86	85	85	98	92	94	78	79	26	26	26	26	16
% días con oscilaciones de HR diarias en invierno superiores a 10%	31	34	32	34	34	32	62	51	53	33	33	7	7	6	6	0
% días que se supera el límite inferior mínimo de HR de 30%HR en el MN	32	24	26	24	26	27	27	29	28	5	5	0	0	0	0	0
JUNIO A SEPTIEMBRE																
% días con oscilaciones térmicas diarias en verano superiores a 2°C	25	25	25	10	4	4	5	5	2	5	2	75	70	83	79	0
% días con oscilaciones térmicas diarias en verano superiores a 5°C	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
% días que se supera el límite máximo superior de temperatura de 27°C	31	31	31	7	7	7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
% días que se supera el límite máximo superior de temperatura de 30°C	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
% días con oscilaciones de HR diarias en verano superiores a 5%	84	84	84	84	84	84	40	86	86	86	87	74	74	74	74	89
% días con oscilaciones de HR diarias en verano superiores a 10%	43	43	43	44	43	43	11	50	50	50	51	44	47	44	43	1
% días que se supera el límite superior máximo de HR de 70%HR en el MN	0	0	0	0	0	0	0	10	11	11	11	0	0	0	0	0
ANUAL																
Oscilación absoluta de HR	15	13	14	16	16	16	17	19	20	12	12	14	14	13	14	6

Sala 4.2 (planta 4, oeste)

RESULTADOS DE LAS CONDICIONES DE TEMPERATURA Y HUMEDAD RELATIVA

Respecto a CP-0921)	M00	M01	M02	M11	M12	M13	M14	M21	M22	M23	M24	M25	M26	M31	M32	M33
OCTUBRE A MAYO																
% días con oscilaciones térmicas diarias en invierno superiores a 2°C	27	31	31	29	24	24	40	30	35	23	24	0	0	0	0	0
% días con oscilaciones térmicas diarias en invierno superiores a 5°C	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
% días que se supera el límite inferior mínimo de temperatura de 17°C	30	32	12	32	29	9	21	9	9	12	13	0	0	0	0	0
% días con oscilaciones de HR diarias en invierno superiores a 5%	83	84	83	84	83	82	98	91	93	90	91	26	26	26	27	16
% días con oscilaciones de HR diarias en invierno superiores a 10%	28	29	29	30	28	28	61	50	53	42	43	7	6	7	7	0
% días que se supera el límite inferior mínimo de HR de 30%HR en el MN	21	21	22	20	21	22	26	29	28	24	23	0	0	0	0	0
JUNIO A SEPTIEMBRE																
% días con oscilaciones térmicas diarias en verano superiores a 2°C	7	7	7	2	1	1	72	85	79	85	80	73	67	81	76	0
% días con oscilaciones térmicas diarias en verano superiores a 5°C	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
% días que se supera el límite máximo superior de temperatura de 27°C	31	30	30	16	21	21	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0
% días que se supera el límite máximo superior de temperatura de 30°C	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
% días con oscilaciones de HR diarias en verano superiores a 5%	74	75	75	77	76	76	48	97	96	97	97	80	74	82	77	90
% días con oscilaciones de HR diarias en verano superiores a 10%	25	25	25	25	25	25	16	66	67	66	67	46	42	49	43	0
% días que se supera el límite superior máximo de HR de 70%HR en el MN	0	0	0	0	0	0	0	14	17	14	17	0	0	0	0	0
ANUAL																
Oscilación HR estacional	12	12	12	13	13	13	16	19	20	18	19	11	13	11	12	6

Bajo cubierta (planta 4)

RESULTADOS DE LAS CONDICIONES DE TEMPERATURA Y HUMEDAD RELATIVA

Respecto a CP-0921)	M00	M01	M02	M11	M12	M13	M14	M21	M22	M23	M24	M25	M26	M31	M32	M33
OCTUBRE A MAYO																
% días con oscilaciones térmicas diarias en invierno superiores a 2°C	1	1	1	1	1	1	1	4	0	4	0	4	0	0	0	0
% días con oscilaciones térmicas diarias en invierno superiores a 5°C	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
% días que se supera el límite inferior mínimo de temperatura de 17°C	67	75	75	77	77	77	84	88	59	88	72	88	34	81	5	0
% días con oscilaciones de HR diarias en invierno superiores a 5%	49	50	49	50	51	50	53	70	47	70	51	68	42	56	39	37
% días con oscilaciones de HR diarias en invierno superiores a 10%	9	10	10	13	12	12	14	24	9	25	10	23	9	15	8	6
% días que se supera el límite inferior mínimo de HR de 30%HR en el MN	5	1	1	1	1	1	1	0	5	0	2	0	15	1	21	26
JUNIO A SEPTIEMBRE																
% días con oscilaciones térmicas diarias en verano superiores a 2°C	15	15	15	15	15	15	15	30	0	30	0	30	0	0	0	0
% días con oscilaciones térmicas diarias en verano superiores a 5°C	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
% días que se supera el límite máximo superior de temperatura de 27°C	25	25	25	15	16	16	3	25	0	25	0	25	0	0	0	0
% días que se supera el límite máximo superior de temperatura de 30°C	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	0	0	0	0
% días con oscilaciones de HR diarias en verano superiores a 5%	57	57	57	59	58	58	26	68	54	68	54	68	54	49	53	56
% días con oscilaciones de HR diarias en verano superiores a 10%	15	15	15	16	16	16	3	24	16	24	17	24	15	14	15	14
% días que se supera el límite superior máximo de HR de 70%HR en el MN	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	1	2	0	2	4
ANUAL																
Oscilación HR estacional	9	9	9	9	9	9	8	25	14	27	10	22	18	7	20	25