



## SIMULACIÓN NUMÉRICA DEL FUNCIONAMIENTO DE DOBLE ENVOLVENTE VENTILADA EN LA REFUNCIONALIZACIÓN DE LA BIBLIOTECA DEL MUSEO DE INSTRUMENTOS MUSICALES Dr. EMILIO AZZARINI

M. P. Diulio<sup>1</sup>, M. García Santa Cruz<sup>2</sup>, A. F. Gómez<sup>3</sup>.  
LAyHS - Laboratorio de Arquitectura y Hábitat Sustentable  
FAU - Facultad de Arquitectura y Urbanismo  
UNLP - Universidad Nacional de La Plata  
Calle 47 N°162 CC 478 - 1900 - La Plata, Buenos Aires, Argentina  
Tel. + 54 221 423 6587 int. 255. e-mail: layhs@fau.unlp.edu.ar

**RESUMEN:** El presente trabajo muestra los resultados de la simulación numérica de las condiciones higrotérmicas realizada con el Programa EnergyPlus aplicadas al análisis para el desarrollo de un proyecto de refuncionalización de la Biblioteca del Museo de Instrumentos Musicales Dr. Emilio Azzarini de la UNLP.

Dicha biblioteca es objeto de estudio del grupo de trabajo desde el año 2003. Utilizando los principios de la *Conservación Preventiva* se pretende alcanzar las condiciones óptimas para perpetuar las colecciones que guarda. El proyecto PIP 2010-12 GI, Diseño, construcción y Monitoreo de reserva de patrimonio cultural sustentable, financiará parte de la realización de la reforma basada en el sistema de doble envolvente ventilada (DEV), ya utilizado en otros proyectos acordes.

La finalidad de este sistema es generar corrientes de aire a través del espacio de cámara generado, retirando el exceso de humedad relativa que existe hoy en la biblioteca, eliminando así uno de los factores más perjudiciales que atentan contra la conservación del papel.

Se modeliza la doble envolvente en EnergyPlus para así obtener una simulación del comportamiento higrotérmico de la DEV.

**Palabras clave:** Doble Envolvente Ventilada, Conservación Preventiva, simulación numérica.

### 1. INTRODUCCIÓN

El museo de Instrumentos Musicales Dr. Emilio Azzarini, dependiente de la Universidad Nacional de La Plata, es miembro de la Red de Museos de la UNLP.

La base principal de su acervo la constituye la colección del Dr. Emilio Azzarini, legada a la Universidad por sus familiares después de su fallecimiento ocurrido en 1963. Desde esa fecha, hasta su creación como Museo el 9 de diciembre de 1985, funcionó dentro del ámbito de la Universidad, como Colección de instrumentos musicales Dr. Emilio Azzarini.

Reúne material de relevante importancia, podemos encontrar: manuscritos de Juan Pedro de Esnaola, "Missa Solemnis" de Beethoven y el único ejemplar conocido del "Boletín Musical" del impresor Ybarra que data de 1837.

Dentro de la clasificación que hace Santi Romero (Romero, S. 2003), la presente se encuadra dentro de lo que se denomina "Biblioteca Especializada", es decir, que tiene un fondo centrado principalmente en un campo específico del conocimiento.

#### 1.1 Caracterización del sitio

La biblioteca estudiada se encuentra en la ciudad de La Plata, al noroeste Provincia de Buenos Aires. Esta ciudad es un centro administrativo y universitario, capital de la provincia y sede de la Universidad Nacional de La Plata.

Se encuentra a 34°55' de latitud sur y 57°57' de longitud oeste en la zona bioambiental III subzona B (IRAM 11603) caracterizada por un clima templado cálido húmedo. La temperatura promedio anual es de 16.1 °C con una amplitud térmica en invierno de 8°C y 10.6 °C en verano.

Por su cercanía al Río de La Plata la humedad relativa es elevada, siendo la media anual del 79%, con un promedio en invierno de 84.3 % y de 72.3 % en verano. El viento dominante es del sudeste. Las precipitaciones medias anuales están calculadas en 1023mm

---

<sup>1</sup> Becaria CIC

<sup>2</sup> Becario LAyHS

<sup>3</sup> Investigadora CONICET

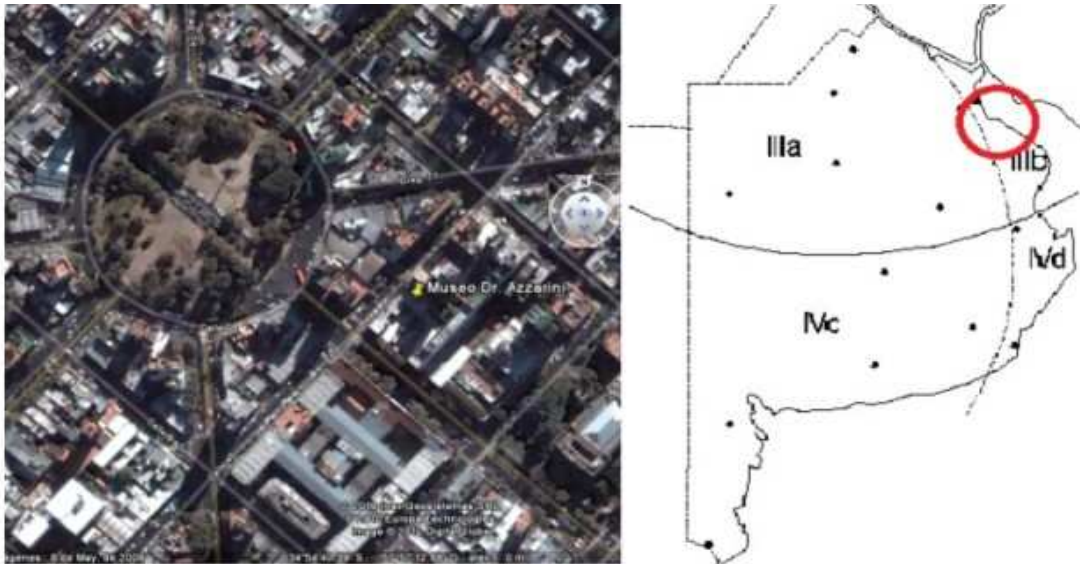


Figura 1: Ubicación de la Ciudad de La Plata (Fuente: Google Maps) dentro de la Provincia de Buenos Aires y su zonificación bioambiental.

### 1.2 Situación actual de la biblioteca.

La Biblioteca es una pequeña construcción de 25m<sup>2</sup>, en lo que era el garaje de la antigua casa donde funciona el museo. Una de sus caras longitudinales está apoyada sobre la medianera NE del terreno, mientras que la otra, orientada al SO está limitada por un sector de servicios. Las caras pequeñas, frente y fondo del local, están en contacto con el exterior. La cubierta constituye una terraza accesible con una pérgola que no es de uso habitual.

Las dimensiones del espacio estudiado son 3,00m de ancho por 6,50 a lo largo. La altura del cielorraso es de 2,70m con un volumen de aire interior de 52,65m<sup>3</sup>.

La envolvente está constituida por muros de ladrillo macizo de 0.20 m de espesor con revoque en ambas caras y la cubierta es de losa de hormigón armado con contrapiso y solado en su parte exterior y cielorraso de yeso aplicado en el interior. Tiene dos aberturas localizadas en el frente y el contrafrente de 2,50 x 2,00 sin protección, con marcos y hojas de madera. Una de ellas funciona como acceso principal y la otra permanece bloqueada por estanterías. Sobre los vidrios se colocaron cortinas de lona vinílica para impedir el ingreso de radiación solar directa. (Figura 2)



Figura 2: Fachada del Museo y biblioteca en patio interior. Planta de la biblioteca

El funcionamiento de la biblioteca es intermitente, ya que no posee personal que trabaje de forma permanente en el lugar, al momento de este trabajo, hay una asistencia de 3 horas semanales de una museóloga que está realizando la revisión general del estado de conservación de los documentos que se encuentran en la biblioteca, climatizando el espacio con una estufa de cuarzo de dos velas (~1800 W). Fuera de este tiempo, no se efectúa ningún tipo de climatización.

### 1.3 Parámetros de conservación

La documentación alojada está constituida básicamente por papel, material muy vulnerable a los daños generados por el ambiente. Estos deterioros son producidos por las fluctuaciones en la temperatura y la humedad relativa, en especial en los cambios de esta última; los picos extremos producen reacciones químicas nocivas, fomentando procesos biológicos como aparición de hongos, alteración de los colores y desintegración progresiva de los materiales orgánicos. El papel es un material altamente higroscópico, es decir, es capaz de absorber y liberar humedad muy rápidamente. Esto produce cambios físicos al contraerse y expandirse con la consecuente disgregación de sus fibras. (Ogden, S; 1988) (Michalski, S; 2007)

Un medio cálido y húmedo permite la germinación de las esporas. Una humedad relativa que sobrepase el 70% manteniendo su nivel por varios días, temperaturas altas, falta de circulación de aire, entre otras situaciones, ayudan a acelerar el proceso de enmohecimiento (Gómez, A. 2009), por lo que el clima en nuestra localidad es ideal para el desarrollo de agentes de deterioro.

En la Figura 4 se muestra un Climograma que reúne las condiciones de conservación de documentos (Bell, L. Faye, B. 1980) y de las condiciones de confort (Olgay, V. 1963).

Si analizamos la situación de la ciudad de La Plata, graficando sus medias anuales veremos un polígono desplazado hacia una zona de mayor HR que la óptima, mientras que la temperatura se encuentra dentro del rango apropiado para el papel y levemente inferior al confort de personas.

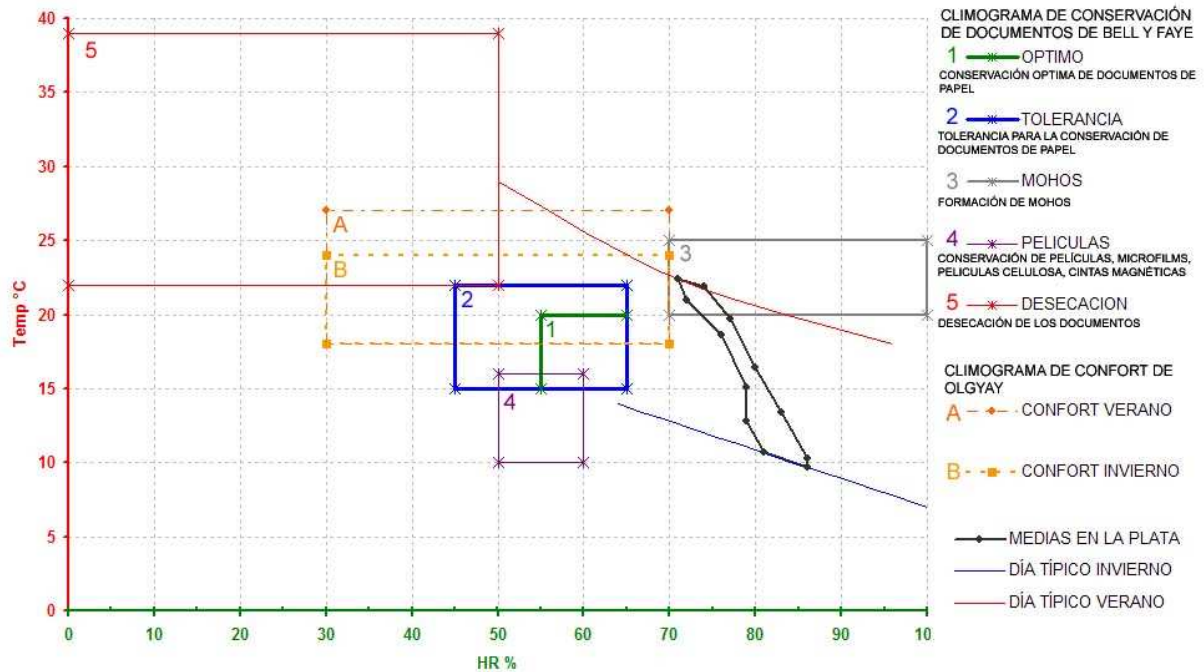


Figura 4: Comparación de climogramas, Condiciones óptimas para la conservación de papel de Bell y Faye; Confort de Olgay y la situación higrotérmica de la Ciudad de La Plata.

Los datos medidos en la auditoria realizada durante el invierno de 2003 muestran que la biblioteca permanece en un estado térmico apto para la conservación del papel, sin embargo sus valores de HR son demasiado elevados (Fig. 5). Recordemos aquí que debemos trabajar con la relación de los dos parámetros: HR y Temperatura.

Es por eso que se realiza una adecuación al edificio para ser utilizada como prototipo de modelo para resolver este tipo de situaciones. Esta resolución ya fue utilizada con muy buenos resultados en el Museo de la Shoá (Gómez, A., 2005)

### 1.4 Descripción de la Doble Envoltente Ventilada DEV

La solución tecnológica a utilizar es la Doble Envoltente Ventilada (DEV) y consiste en crear una nueva piel interior separada de la existente, generando una cámara de aire que permita una circulación permanente de aire a baja velocidad bajando así el contenido de humedad. Este espacio intersticial se comunica al ambiente interior a través de rejillas correctamente protegidas situadas tanto en la franja superior como inferior de los nuevos tabiques, para ser utilizado de ser necesario como renovación de aire. Asimismo se comunicará de forma indirecta con el ambiente exterior, a través de

conductos situados en el muro existente. El hecho de atravesar una cámara de aire intermedia le otorga al aire la capacidad de estabilizarse amortiguando picos en su temperatura y HR.

La finalidad de este trabajo es simular el comportamiento higrotérmico del edificio para entender su funcionamiento en las distintas etapas, una sin ningún tipo de ventilación representando la situación actual, y luego cómo funcionaría la doble envolvente propuesta. Una simulación detallada del edificio en etapas de diseño nos permitirá detectar futuros problemas higrotérmicos que pongan en riesgo la conservación de los bienes alojados. Es por esto que constituye una herramienta fundamental para proponer soluciones que corrijan o minimicen estos problemas.

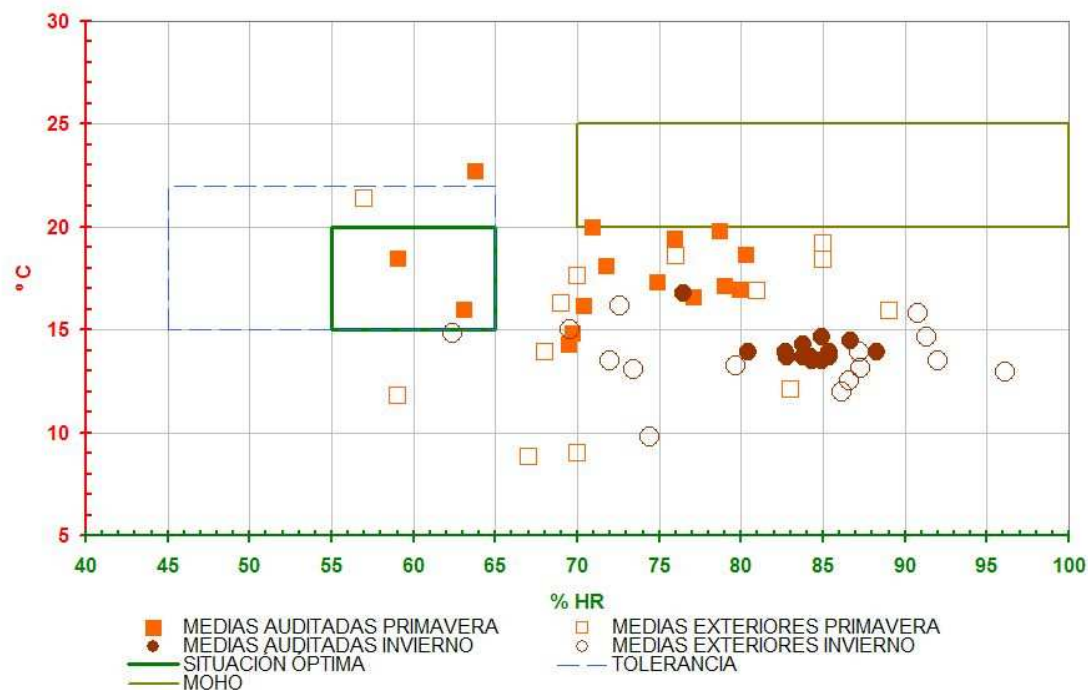


Figura 5: Ubicación de la temperatura y humedad relativa media diaria del periodo respecto de las condiciones óptimas de conservación de papel (nomograma Bell y Faye).

La resolución se compone de 6 capas (ver Figura 6):

a) Piel interior: el objetivo de esta piel es absorber parte de humedad interior, amortiguando picos, para cederlo al aire en movimiento de la cámara de aire. Para esto se usa un doble emplacado de roca de yeso de 25 mm de espesor en muros y 12,5 mm en cielorraso. La terminación interior debe realizarse con pintura difícilmente inflamable de mediana a alta permeabilidad al vapor de agua ( $\mu$  20 a 70 g/m<sup>2</sup>h<sup>0</sup>KPa). La cara que da a la cámara de aire debe ser de baja emisividad materializada con una membrana aluminizada tipo "Harvi Foil". Esta membrana debe ser micro perforada para facilitar la migración del vapor de agua del interior del local al aire que circula por la cámara. La superficie aluminizada reduce la emisión de calor en invierno y rechaza el calor emitido por muros, techos y el aire circulante en verano. Con bajo espesor se logra un aceptable nivel de aislamiento térmico ( $K= 0,9$  W/m<sup>2</sup>K), donde se prioriza el mantenimiento de niveles de humedad interior adecuados a los bienes conservados. La cara interior se concreta con pintura difícilmente inflamable y placa de yeso de roca resistente al fuego.

b) Espacio medianamente ventilado: el prisma interior queda separado de los cerramientos exteriores por una cámara de aire continua de 60 mm de espesor. El aire circula desde el interior del edificio al exterior de manera continua y sin interrupciones. El aire que circula por la cámara toma humedad de la piel interior y del cerramiento existente de mampostería desecándolo con el paso del tiempo y evitando la acumulación de humedad en estos.

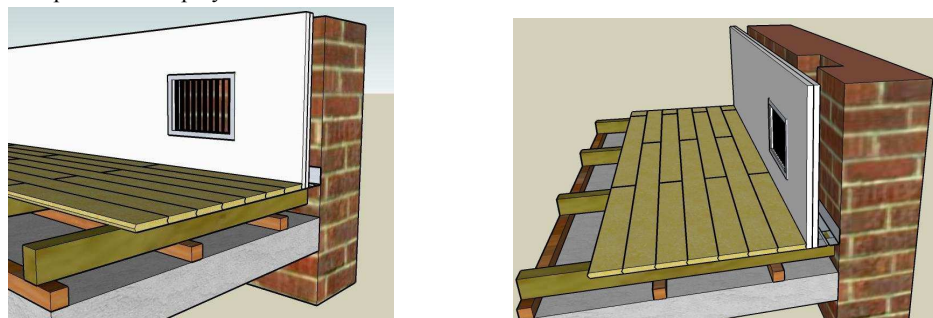


Figura 6: Detalle constructivo de la resolución de la DEV.

c) Forzador pasivo de ventilación de cámara de aire: éste se materializa mediante dos conductos de sección rectangular ubicados en el espacio de aire entre el tabique interior del local y la medianera norte. Los conductos una vez en el exterior continúan hasta sobresalir 1 m en la terraza terminando con sendos extractores de aire pasivos.

Esta tubería de ventilación materializada en chapa galvanizada N° 18 debe pintarse de negro para favorecer el calentamiento del aire y mejorar la extracción. Este sistema no requiere de motores eléctricos ya que es accionado por el viento y las diferencias de presión y temperatura entre el interior del edificio y el exterior. Es silencioso, eficaz y no consume energía.

d) Forzador pasivo para mejorar la ventilación del local: la ventilación del local se restringirá a la doble puerta de ingreso. Se prevén cuatro aberturas de 500 cm<sup>2</sup> en la parte baja y alta del local. La abertura baja toma aire del espacio intersticial y la abertura alta lo expulsa al mismo mediante los extractores pasivos de la cámara de aire.

e) Mejorador de la calidad del aire interior: el aire interior tiene una primera fase de acondicionamiento materializada con una toma desde el espacio entre la doble puerta de entrada con filtro de carbón activado para retener partículas y ciertos componentes orgánicos en suspensión. Se ubica en la parte inferior del local. Queda previsto que en esta toma se adicione un equipo desecante (silicagel) del aire que ingresa al local. La salida de aire de sección similar se ubicará en la parte alta del local y contará con una reja semiautomática que se cierra en caso de incendio.

f) Envoltente exterior de alta emisividad y alta permeabilidad al vapor de agua: los paramentos interiores preexistentes se dejarán con la mampostería a la vista para aumentar la permeabilidad al vapor de agua.

## 2. METODOLOGÍA

La biblioteca es estudiada por este equipo de trabajo desde el año 2003, a través de relevamientos y mediciones. Las mediciones fueron realizadas en dos campañas: una en 2003 y otra en 2006. Los resultados muestran el estado crítico del ambiente en el que permanece la colección ya que si bien la temperatura oscila cerca de la mínima admisible, la humedad excede ampliamente las condiciones óptimas.

El objetivo principal de esta simulación es conocer los resultados que arrojarán las mediciones luego de finalizada la ejecución de la DEV. Esto nos daría la oportunidad de hacer modificaciones al proyecto si los resultados no fueran satisfactorios.

### 2.1 Datos auditados

Se colocaron tres microadquisidores de datos HOBO H08-004-02 en el interior y un HOBO WaterProof en resguardo meteorológico en el exterior que registraron cada 10 minutos información referente a temperatura, humedad relativa, punto de rocío e iluminación.

Los datos obtenidos mediante los microadquisidores fueron clasificados, analizados y graficados con Excel®. Se grafican tanto la HR como la temperatura interior y exterior. Los datos se muestran comparados con la situación óptima de conservación. (de Guichen, G. 1984)

### 2.1 Datos simulados

Para llevar a cabo las simulaciones se realizó un modelo en Energy Plus (EP) mediante el complemento de Open Studio en Google SketchUp que permite visualizar una maqueta virtual del local a simular. (Figura 7)

Luego se procedió a incorporarle al programa información externa necesaria para evaluar los resultados. Los datos incorporados se resumen en la siguiente manera:

a) Ubicación del edificio en su contexto, coordenadas, período del año a simular y cantidad de días, agendas de uso y ventilación, materiales que conforman la envoltente, espacios de ventilación, sombras arrojadas sobre el volumen a evaluar, contenido de agua de los materiales, sistemas constructivos de los materiales utilizados, grado de exposición de cada zona al viento y al sol, renovaciones de aire, y por último las variables de los datos de salida que en este caso fueron temperatura en °C, humedad relativa en % y humedad específica en gramos de agua por m<sup>3</sup> de aire seco. Estos datos se solicitan tanto para el interior como para exterior.

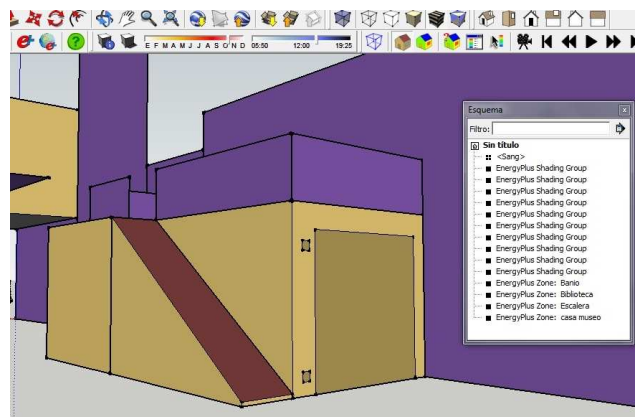


Figura 7: Maqueta en Google SketchUp para interacción con Energy Plus

b) El EnergyPlus (EP) cuenta con una base de datos climática de los últimos 20 años de la que selecciona los períodos extremos de cada mes para conformar un archivo de clima anual representativo de la localidad. Es con esta información con la que se deduce el comportamiento del clima exterior. Como se contaba con datos auditados para condiciones climáticas externas correspondientes a las mediciones interiores y en el sitio, se incrustaron estos datos al archivo del clima utilizado por EP para período seleccionado. De esta manera se buscó que la respuesta del edificio para el modelo simulado corra bajo las mismas condiciones que el modelo real. (US Department of Energy, 2009) (Melo, A. P. et al, 2008)

Para realizar la simulación de los datos se establece el mismo periodo auditado pero anticipando el inicio un mes para permitir que el edificio alcance estado de régimen. También se le incorpora una carga de humidificación de  $45,86 \text{ gr/m}^3$  generada por la diferencia de contenido de agua que posee el aire interior respecto al exterior. Este volumen de humedad absoluta queda contenido en el ambiente al no haber recirculación de aire suficiente, y por eso debemos considerarlo como una fuente adicional de humedad. Para modelizar esta situación se calculó la diferencia de volumen de agua y su correspondiente acumulación diaria.

En el caso de la simulación con DEV se suprime la carga de humidificación que aporta el ambiente exterior por quedar ésta fuera del ambiente a simular (queda en el espacio intersticial). Hasta el presente grado de avance del trabajo se ha logrado simular un ambiente totalmente cerrado dentro de un ambiente ventilado. Es decir, quedan excluidos por el momento los conductos que recorren la cámara de aire.

### 3. ANÁLISIS DE RESULTADOS

La simulación realizada sobre la situación actual, muestra una razonable aproximación a los datos auditados. Ha resultado más simple manejar la temperatura, sin embargo la humedad relativa se ve afectada por situaciones de ventilación mucho más sensibles y difíciles de manejar.

Se observa que los datos obtenidos al incorporar la doble envolvente ventilada arrojan resultados que tienden a cumplir con los valores admisibles de temperatura y humedad relativa, sin embargo, la no utilización de los conductos de ventilación otorga una falta de precisión en los resultados. Puede inferirse que una vez incorporado este dato, los valores se elevaran con motivo del intercambio de aire con el exterior.

#### 3.1 Humedad Relativa

Se puede observar en la fig. 8 que el edificio amortigua muy bien las oscilaciones de HR exterior. Si bien supera en exceso la máxima admisible es una característica positiva el hecho que permanezca razonablemente estable. De acuerdo con las premisas de conservación, es preferible obtener condiciones constantes a condiciones óptimas con grandes oscilaciones, ya que es justamente en éstas cuando se generan los daños en los documentos, ya sea por deformaciones físicas o alteraciones químicas.

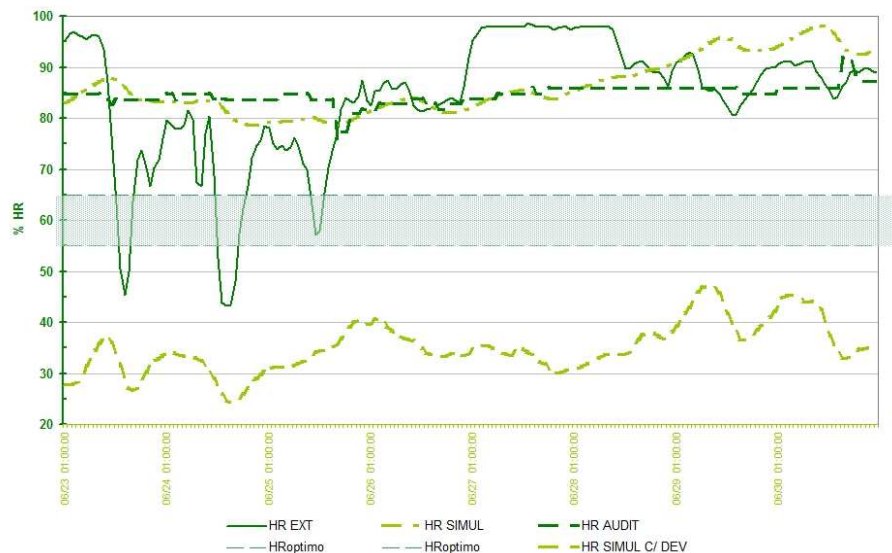


Figura 8: Humedad relativa en el transcurso del periodo estudiado para datos exteriores, de auditoría, simulados en las condiciones actuales y simulados con DEV.

En la simulación se observa una leve tendencia a acompañar con cierto retardo la situación exterior. El hecho que las mediciones coincidan con los datos reales auditados nos da la seguridad que el modelo creado es válido para proceder con la etapa siguiente de simulación con DEV.

Al incorporar la DEV a la simulación se detecta un fuerte descenso de la HR con valores extremos de 25% y 45%, muy por debajo de los parámetros esperados. Esto puede atribuirse a que se considera la envolvente interior exenta de las ventilaciones.

### 3.2 Temperatura

El edificio se encuentra con una temperatura promedio de 1,2 °C por debajo de los valores ideales de temperatura, sin embargo es también una ventaja que las variaciones sean menores a 1,5 °C en todo el periodo ya que la estabilidad, como se ha observado, es un aspecto positivo.

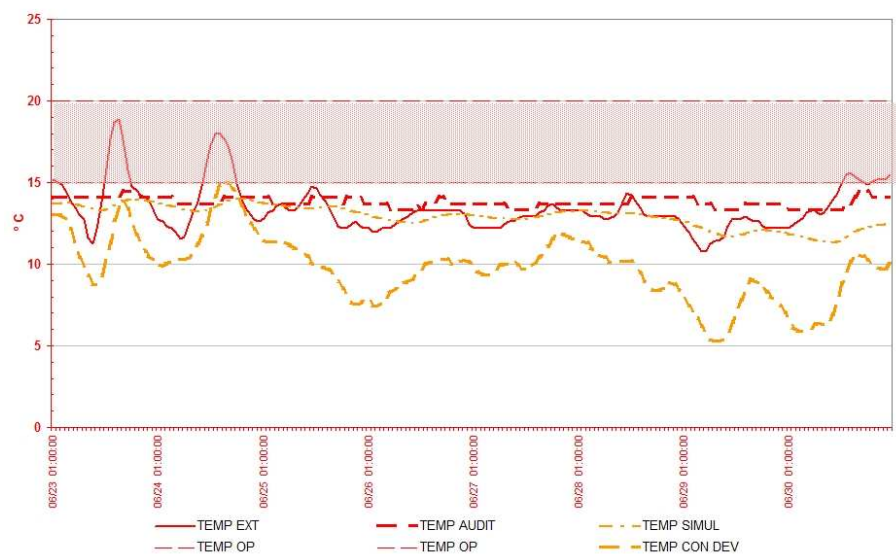


Figura 9: Temperatura en el transcurso del periodo estudiado para datos exteriores, de auditoría, simulados en las condiciones actuales y simulados con DEV.

Podrían alcanzarse valores óptimos de temperatura incorporando aislamiento térmico en los muros exteriores, en la cubierta, y mejorando la estanqueidad de aberturas. Por otra parte si se alcanzara la temperatura óptima sin resolver previamente el exceso de HR se caería dentro de las condiciones adecuadas para el florecimiento de mohos y otros agentes de deterioro del papel.

### 3.3 Análisis de un día típico de invierno

Promediando los datos horarios de la semana estudiada obtenemos un esquema que nos representa la tendencia de temperatura hora a hora.

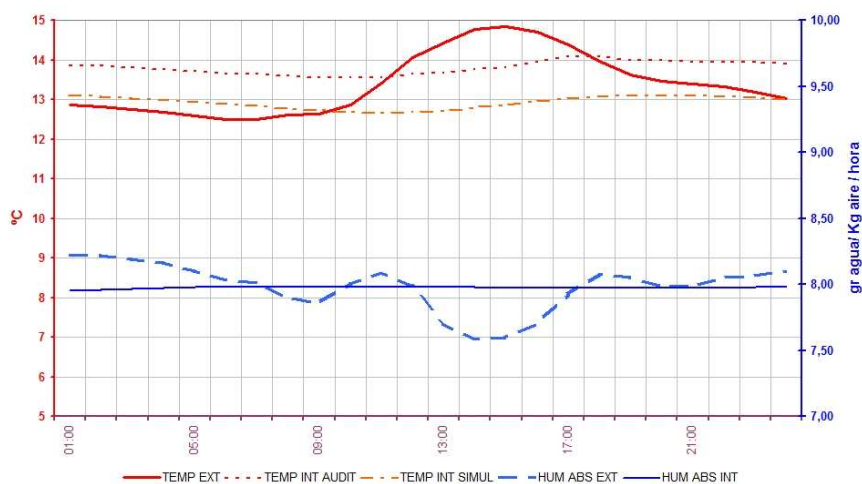


Figura 10: Análisis de la temperatura y la humedad absoluta de un día típico de invierno promedio.

Se puede observar claramente que durante el pico de máxima temperatura se registra la mínima humedad relativa; y que a su vez esto ocurre entre las 13 y las 16 horas.

## 4. CONCLUSIONES

En esta etapa de avance de la simulación no se ha podido ajustar el EP para analizar las variaciones que otorgarían las ventilaciones internas. Los resultados obtenidos en el Museo de la Shoá en 2005 llevan a afirmar que se alcanzarán valores ideales, sin dispositivos mecánicos ni eléctricos, utilizando simplemente corrientes de aire protegidas.

Lo que sí verificamos es que este programa brinda la posibilidad de realizar los estudios necesarios para este tipo de espacios, donde la HR es el parámetro más importante a controlar para la conservación de los bienes.

Por otra parte, analizando la situación de un día típico de invierno se puede concluir que es durante las horas de la primera tarde cuando es conveniente abrir los cerramientos y permitir el ingreso franco de aire exterior.

En el siguiente gráfico (Fig. 11) podemos observar la ubicación de los puntos simulados con DEV alineados en el ángulo izquierdo inferior y vemos un exceso en la reducción de HR.

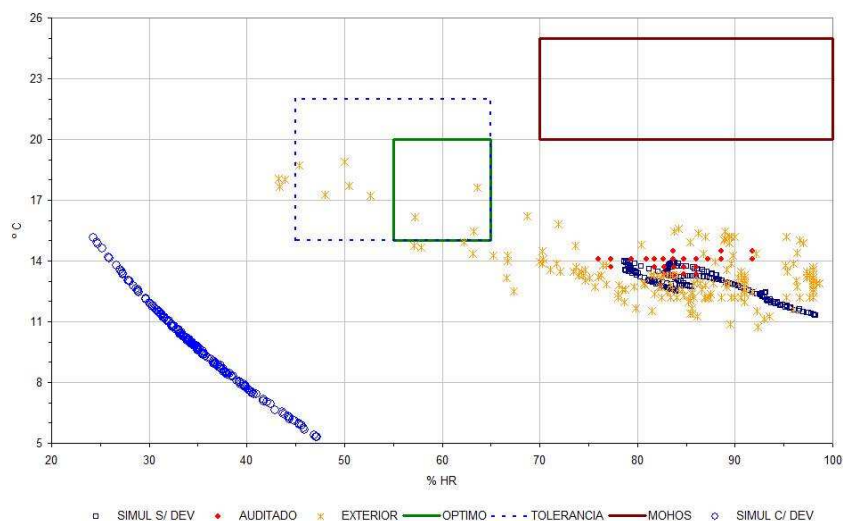


Figura 11: Comparación de los datos exteriores, auditados y simulados con y sin doble envolvente ventilada con las condiciones óptimas de conservación de Bell y Faye.

## REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Bell, L; Faye, B. (1980) La concepción de los edificios de archivos en países tropicales. UNESCO. Paris.
- Romero, S. (2003) La arquitectura de la biblioteca. Recomendaciones para un proyecto integral. Pag 16. 2º edición. Ed. Escola Sert. Barcelona.
- Ogden, S. (editora) (2000) Temperatura, humedad relativa, luz y calidad del aire: pautas básicas para la preservación. Manual de preservación de bibliotecas y archivos del Northeast Document Conservation Center. DIBAM-Chile.
- Olgay, V. (1963) Desing with climate. Bioclimatic approach to architectural regionalism. Princeton University Press.
- Filipin, C. (2005). Uso Eficiente de la energía en edificios. 1º ed. Amerindia. La Pampa.
- Michalski, S. (2007) Cómo administrar un museo: manual práctico. Capítulo 4: "Preservación de las Colecciones"
- IRAM, Instituto Argentino de Normalización (2002). Serie de normas sobre acondicionamiento térmico de edificios. Norma 11603 – Acondicionamiento térmico de edificios. Clasificación bioambiental de la República Argentina.
- Gómez, A. (2009) "Una aproximación al diseño ambientalmente consciente en espacios de guarda. Estudio de casos". Seminario de Investigación en Museología de los países de habla portuguesa y española. Porto, Portugal. ISBN: 978-972-8932-61-9. Editor: Universidade do Porto / Faculdade de Letras / Biblioteca Digital.
- Gómez, A. et al (2005) Museo del Holocausto (Shoa) Fundación Memoria del Holocausto de la Ciudad de Buenos Aires, Argentina. Mediciones higrotérmicas en la Reserva. ENCAC – ELACAC 2005.
- Osborne, A et al (2010) Simulation Prototyping of an Experimental Solar House. Energies 2010. ISSN 1996-1073
- Energy Plus manual del programa. [http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/energyplus\\_documentation.cfm](http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/energyplus_documentation.cfm)
- De Guichen, Gaël. (1984) Climate in museums. Measurement. Centre International pour la Conservation, ICCROM, Roma, 1998
- Melo, A. P; Lamberts, R (2008) Manual de simulação computacional de edificios naturalmente ventilados no programa EnergyPlus. Laboratorio de Eficiência Energética em Edificações. Universidade Federal de Santa Catarina. Brasil.
- US Department of Energy (2009) Input output reference. The encyclopedic reference to EnergyPlus input and output. EE.UU.

**ABSTRACT:** This paper presents the results of a numerical simulation of Hygrothermal conditions made by Energy Plus software applied to the proposed refurbishment of the Library of Musical Instruments Museum Dr. Emilio Azzarini of the UNLP.

The library has been under study by this team since 2003. Using the principles of preventive conservation is to achieve the optimal conditions to perpetuate the collections it holds. The 2010-12 PIP project GI, Design, Construction and Monitoring of sustainable cultural heritage reserve, finance part of the implementation of the reform based on the double-ventilated enclosure (DVE), already used in other similar projects.

The purpose of this system is to generate airflow through the chamber space created by removing the excess humidity that exists today in the library, eliminating one of the most damaging factor that threaten the conservation of paper.

Getting real results on the comparison of graphs obtained by measurement and simulation will lead us to obtain equally true results in the simulation with the proposed changes of the library after the DVE generated.

**Keywords:** Double Ventilated Enclosure, Preventive Conservation, numerical simulation.

### Agradecimiento:

Agradecemos al Dr. Jorge D. Czajkowski por sus comentarios en la fase de modelización e interpretación de la simulación.