



Escola Politècnica Superior
d'Edificació de Barcelona

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

MÁSTER EN EDIFICACIÓN TESINA FINAL DE MÁSTER

ESTRATEGIAS DE VENTILACIÓN NATURAL EN EDIFICIOS PARA LA MEJORA DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA

Autor: Hamilton Dias Bordalo Junior

Directoras: Ana María Lacasta Palacio

Inmaculada Rodríguez Cantalapiedra

Barcelona, octubre de 2010.

MÁSTER EN EDIFICACIÓN
TESINA FINAL DE MÁSTER

ESTRATEGIAS DE VENTILACIÓN NATURAL EN EDIFICIOS
PARA LA MEJORA DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA

Tesina presentada al Máster Universitario Oficial en Edificación de la Universitat Politècnica de Catalunya – UPC, como parte de los requisitos para la obtención del título de Máster en Edificación en la especialidad de Tecnología.

Autor: Hamilton Dias Bordalo Junior
Directoras: Ana María Lacasta Palacio
Inmaculada Rodriguez Cantalapiedra

Barcelona, octubre de 2010.

“Be the change you want to see in the world”.

Mahatma Gandhi

RESUMEN

La eficiencia energética es fundamental para hacer frente al gran consumo actual de energía de los edificios, que tan relacionado está con muchos impactos medioambientales. La ventilación natural se presenta como una importante alternativa sostenible a los sistemas de refrigeración, proporcionando confort e incluso mejorando la calidad del aire interior sin la necesidad de sistemas mecánicos, reduciendo así el consumo energético de los edificios. El presente trabajo hace una revisión del estado del arte sobre ventilación natural para confort y enfriamiento pasivo de los edificios y se centra posteriormente en el estudio de un edificio concreto situado en la ciudad de Barcelona (la biblioteca de la ETSAB, UPC). Se han realizado mediciones *in situ* para conocer el funcionamiento del edificio objeto de estudio, así como simulaciones con el programa DesignBuilder dirigidas a probar diferentes estrategias de ventilación natural para encontrar la más adecuada para el edificio. Con la opción escogida, se han hecho simulaciones con el módulo CFD (Computational Fluid Dynamics) para analizar la distribución interior de temperatura y de velocidad del aire y así comprobar su eficacia para proporcionar confort. Basándose en el Estándar de Confort Adaptativo, se llegaron a buenos resultados de la aplicación de la ventilación natural en sustitución del aire acondicionado para el clima de Barcelona. Se han realizado así mismo comparaciones sobre el funcionamiento en otros dos climas diferentes.

Palabras-clave: Ventilación Natural, Estrategias Pasivas, Simulaciones, DesignBuilder, CFD, Confort Adaptativo.

ABSTRACT

Energy efficiency is essential to cope with the large energy consumption of buildings that it is still related to many environmental impacts. Natural ventilation appears as an important sustainable alternative cooling system, providing comfort and even improving indoor air quality without the need for mechanical systems, therefore reducing the energy consumption of buildings. This paper reviews the state of the art of the natural ventilation strategies for comfort and passive cooling of buildings and then focuses on the study of a building located in the city of Barcelona (the library ETSAB, UPC). Measurements have been performed in situ to see how the building under study, and simulations with the program DesignBuilder aimed at testing different natural ventilation strategies to find the most suitable for the building. With the option chosen, have done simulations with the integrated CFD (Computational Fluid Dynamics) to analyze the internal distribution of temperature and air velocity and thus verify its effectiveness in providing comfort. Based on the Adaptive Comfort Standard, is got good results from the application of natural ventilation in place of air conditioning for the climate of Barcelona. Likewise, have been made comparisons of performance in two different climates.

Key-words: Natural Ventilation, Passive cooling, Simulation, DesignBuilder, CFD, Adaptive Comfort.

ÍNDICE

1	INTRODUCCIÓN.....	5
1.1	OBJETIVOS.....	6
1.1.1	Objetivo General.....	6
1.1.2	Objetivos Específicos.....	6
1.2	ANTECEDENTES.....	7
2	ESTADO DEL ARTE.....	11
2.1	INTRODUCCIÓN.....	11
2.2	FUNDAMENTOS FÍSICOS DE LA VENTILACIÓN NATURAL.....	14
2.2.1	Ventilación conducida por el Viento.....	14
2.2.2	Ventilación conducida por el Efecto Stack (Chimenea).....	15
2.2.3	Ventilación conducida por el efecto combinado del viento y del efecto Stack...18	
2.2.4	Flujo de aire a través de aberturas.....	18
2.3	MÉTODOS DE ESTUDIO PARA ESTIMAR LOS PARÁMETROS DE LA VENTILACIÓN NATURAL.....	19
2.3.1	Experimentos sobre modelos.....	19
2.3.2	Mediciones directas sobre los espacios.....	20
2.3.3	Modelos de cálculos.....	20
2.4	MÉTODOS DE VENTILACIÓN NATURAL.....	21
2.4.1	Ventilación Unilateral.....	21
2.4.2	Ventilación Cruzada.....	22
2.4.3	Ventilación por efecto Chimenea.....	23
2.4.4	Combinación de los tres Métodos.....	25
2.4.5	Aplicaciones de los Métodos Fundamentales.....	25
2.5	VENTILACIÓN NATURAL Y EFICIENCIA ENERGÉTICA. ESTRATEGIAS.....	27
2.5.1	Ventilación natural para enfriamiento directo.....	28
2.5.2	Ventilación natural para enfriamiento indirecto.....	30
2.6	SIMULACIÓN ENERGÉTICA Y CFD.....	32
3	METODOLOGÍA.....	35
3.1	EDIFICIO OBJETO DE ESTUDIO.....	35
3.1.1	Descripción del Proyecto.....	36
3.1.2	Ubicación y Región Climática	40
3.1.3	Materiales Constructivos.....	41
3.2	ELABORACIÓN DEL MODELO COMPUTACIONAL.....	42

4	MEDICIONES IN SITU.....	47
4.1	MEDICIONES DE TEMPERATURA Y HUMEDAD RELATIVA DEL AIRE.....	47
4.2	MEDICIONES DE CO ₂	49
4.3	MEDICIONES DE VELOCIDAD DEL AIRE INTERIOR Y EXTERIOR.....	50
4.4	MEDICIONES DE FLUJOS EN CERRAMIENTOS.....	54
4.5	ANÁLISIS GENERAL DE LOS RESULTADOS.....	56
5	SIMULACIONES COMPUTACIONALES.....	57
5.1	METODOLOGÍA.....	57
5.2	LAS SIMULACIONES.....	57
5.3	PARÁMETROS CONFIGURADOS EN EL DESIGNBUILDER.....	60
5.3.1	Sistema de Climatización HVAC.....	60
5.3.2	Ventilación Natural.....	61
5.3.3	Ventanas.....	62
5.4	RESULTADOS INICIALES Y ANÁLISIS.....	64
5.4.1	Simulación de Referencia.....	64
5.4.2	S-1.1: Edificio actual + ventilación de confort.....	66
5.4.3	S-1.2: Edificio actual + ventilación de confort y nocturna.....	67
5.4.4	S-1.3: Edificio actual + ventilación nocturna y climatización.....	68
5.4.5	S-2.1: Edificio con más aberturas + ventilación de confort.....	69
5.4.6	S-2.2: Edificio con más aberturas + ventilación de confort y nocturna.....	70
5.4.7	S-2.3: Edificio con más aberturas + ventilación nocturna y climatización.....	70
5.4.8	S-3.1: Edificio con lamas y más aberturas + ventilación de confort.....	72
5.4.9	S-3.2: Edificio con lamas y más aberturas + vent. de confort y nocturna.....	72
5.4.10	S-3.3: Edificio con lamas y más aberturas + vent. nocturna y climatización.....	73
5.5	COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS.....	74
5.6	SIMULACIÓN DE DINÁMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL (CFD).....	77
5.6.1	Configuraciones del Contorno.....	77
5.6.2	Resultados y Análisis.....	78
5.7	SIMULACIÓN CON OTROS ENTORNOS CLIMÁTICOS.....	93
5.7.1	Simulación con entorno climático de Belém.....	93
5.7.2	Simulación con entorno climático de São Paulo.....	95
5.7.3	Comentarios Generales	96
6	CONCLUSIONES.....	97
	RECOMENDACIONES.....	99
	BIBLIOGRAFÍA.....	100
	ANEXOS.....	105

1. INTRODUCCIÓN

La energía está directamente ligada a todos los aspectos del desarrollo de la sociedad moderna y tiene un gran impacto en el bienestar de los habitantes de las ciudades: en la salud, educación, productividad, economía entre otros. El consumo de energía es uno de los parámetros que define la calidad de vida y el nivel de desarrollo de una ciudad o país. Cuanto mayor más desarrollado es el lugar [1].

Sin embargo, su producción y consumo todavía están asociados a la contaminación del medioambiente y a los cambios climáticos que se observan en la actualidad. Hemos visto en los últimos años un gran aumento del consumo de energía en el planeta y de una forma muy desigual entre los países desarrollados y los países en vía de desarrollo que sumado al crecimiento poblacional tiende a una situación insostenible.

Por eso, mejorar el funcionamiento y prestaciones de los productos y servicios en relación a sus consumos de energía, o sea, mejorar la eficiencia energética de ellos es muy importante en todos los sectores de la economía, en particular el sector de la construcción que es uno de los que más consumen, desde la extracción de recursos hasta la utilización y vida útil del producto, en este caso los edificios.

La ventilación natural ha tenido mucho más relevancia recientemente como una herramienta sostenible capaz de reducir el consumo de energía para enfriamiento, llegando hasta a reemplazar totalmente el aire acondicionado en algunas situaciones y aún más, mejora sensiblemente la calidad del aire interior de los edificios. No obstante, este aumento de su importancia, en particular en los edificios de oficina, está todavía restringido a pocos países de la Europa y ahora se introduce en los EEUU también.

Esto puede ser explicado en parte al limitado conocimiento que hay entre los arquitectos e ingenieros sobre los mecanismos y estrategias de ventilación natural, generando mucha inseguridad en el momento del diseño sobre cómo garantizar la eficacia y los niveles de confort adecuados a los futuros ocupantes. Por eso es esencial divulgar y profundizar los estudios en este tema.

El presente trabajo busca contribuir en este sentido. Utilizando un caso práctico de estudio se pretende analizar las soluciones de ventilación natural para reducir el consumo energético de un edificio en concreto de la ciudad de Barcelona, por medio de simulaciones energéticas y de Dinámica de Fluidos Computacional o CFD (del inglés *Computational Fluid Dynamics*). Estas son unas de las herramientas más importantes actualmente para ayudar los diseñadores a desarrollar construcciones más sostenibles.

1.1. OBJETIVOS

1.1.1. Objetivo General

El objetivo principal de esta investigación es estudiar las diferentes estrategias de ventilación natural para mejorar la eficiencia energética de edificios por medio del análisis de un caso en concreto a través de simulaciones computacionales.

1.1.2. Objetivos Específicos

Los objetivos específicos de este trabajo son:

- 1 - Investigar el estado del arte de las estrategias de ventilación natural aplicadas para reducir el consumo de energía de edificios y proveer confort a los ocupantes;
- 2 - Analizar el funcionamiento del edificio objeto de estudio y su eficiencia para proporcionar confort a los usuarios a través de mediciones en situ;
- 3 - Investigar diferentes estrategias de ventilación natural en un edificio existente de la ciudad de Barcelona en el periodo de verano por medio de un software de simulación computacional;
- 4 - Verificar por medio de las simulaciones la eficiencia y viabilidad de la ventilación natural para reducir el consumo de energía en este edificio en concreto, escogiendo así la mejor opción para el caso estudiado;
- 5 - Estudiar las distribuciones de temperatura y los patrones de los flujos internos de aire en el edificio a través de simulaciones de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD);
- 6 - Comparar la eficiencia de la ventilación natural en el clima mediterráneo y con su eficiencia en otros climas distintos mediante simulaciones del mismo edificio en otras regiones climáticas.

1.2. ANTECEDENTES Y PROBLEMÁTICA ACTUAL

En el inicio del siglo pasado, la energía estaba disponible en cantidades que parecían infinitas, su precio era bajo y no había una consciencia general sobre la polución generada por su producción [2,3]. Por lo tanto, el consumo aumentaba de forma exponencial para acelerar el desarrollo de los países [3].

Después de la 2ª Guerra Mundial hubo una expansión de las técnicas constructivas y la consolidación de la tecnología de climatización artificial, lo que permitió la construcción de edificios con total independencia de los factores climáticos externos, pues los problemas de aumento de calor o frío eran solucionados por los nuevos equipamientos de climatización y a un coste irrisorio de la energía [2,3,4].

Esto añadido a la globalización o internacionalización de la arquitectura ha hecho que muchos proyectos fuesen copias de otros situados en una localización geográfica totalmente distinta. En el diseño de los edificios, perdió importancia la preocupación por el clima local, la orientación de las fachadas, la ventilación natural, la relación entre muros opacos y vidriados, los materiales constructivos o cualquier técnica para reducir el consumo de energía durante la vida útil del edificio [2,3].

Esta situación sólo empezó a cambiar con la crisis del petróleo en los años 70. El aumento súbito de su precio y su consecuente escasez ha hecho despertar la conciencia de la opinión pública de que los recursos energéticos más empleados eran finitos y que había que preservarlos, reduciendo el consumo sin límites [3].

Una de las primeras respuestas a la crisis en el sector de la construcción fue reducir las pérdidas de calor por las renovaciones e infiltraciones de aire en los edificios, con envolventes herméticamente selladas. Esta medida provocó grandes reducciones del consumo energético en el invierno, sin embargo un gasto mayor en el verano y más allá de esto surgieron los problemas relacionados con el exceso de humedad: formación de hongos, bacterias en los conductos de aire entre otros [3].

Como no eran esperados, la mayoría de los problemas de calidad del aire interior sólo fueron descubiertos después de estudios realizados en los años 80 en edificios en que parte de sus ocupantes tenían con frecuencia los mismo síntomas de enfermedades [3]. Estos edificios, en su mayoría edificios de oficinas con grandes superficies vidriadas y selladas, debido a sus bajos niveles de ventilación interior, contenían aire enrarecido con altos niveles de dióxido de carbono, contaminantes, virus y bacterias, etc. que causaban enfermedades y bajan la productividad de sus usuarios [3].

Esto fenómeno quedó conocido como el Síndrome del Edificio Enfermo (SEE), que posteriormente fue definida por la Organización Mundial de la Salud (OMS) como un conjunto de enfermedades originadas o estimuladas por la contaminación del aire en estos espacios cerrados. El descubrimiento de la SEE motivó después la creación de normativas y reglamentaciones más exigentes en Europa y en los EE.UU. para la ventilación y renovación del aire interior en espacios confinados [3], sin embargo hasta la fecha muchos edificios tienen problemas graves de calidad de aire interior debido a una baja renovación del aire [1].

Paralelo a esto, en la arquitectura surgían movimientos como el llamado arquitectura solar, donde los arquitectos tenían de nuevo la preocupación por la orientación solar en los proyectos con intención de ayudar a la calefacción de los edificios y disminuir el consumo de energía. Paulatinamente, para muchos arquitectos fue tomando importancia nuevamente la integración del diseño con el clima local y el confort de los ocupantes, preocupándose también por los problemas ambientales del momento, surgía entonces la llamada Arquitectura Bioclimática [2].

Pasada la crisis del petróleo de los años 70, el mundo continuó desarrollando tecnologías para reducir el desperdicio de energía en muchos sectores de la economía, pero también poco a poco fue retomando los consumos normales a medida que el mercado y la población mundial crecían. Los ambientalistas comenzaron a ganar fuerza y los problemas derivados también del gran consumo energético como el Calentamiento Global y el aumento del Agujero de Ozono pasaron a tener más relieve en el mundo [3].

En 1985 el Convenio de Viena consiguió avances en medidas para la protección de la salud y del medioambiente que resultó en 1987 el Protocolo de Montreal, considerado un marco de cooperación internacional al conseguir un alto grado de aceptación de los países para una causa, la protección de la Capa de Ozono. En este Protocolo hubo la prohibición o reducción de sustancias como los CFCs (CloroFluorCarbonados) y otros refrigerantes comprobadamente responsables por su agotamiento [3,5].

La década de 90 fue marcada por reforzar la concienciación pública a escala mundial sobre los problemas relacionados con el Calentamiento Global y el Cambio Climático, con varias convenciones de las Naciones Unidas hasta llegar a la aprobación del Protocolo de Kioto en 1997 [6]. Su documento contiene el compromiso asumido por la mayoría de los países industrializados de reducir sus emisiones de algunos gases de efecto invernadero (en especial el CO₂), responsables del recalentamiento del planeta, en una media de un 5% de las emisiones de 1990 durante el quinquenio 2008-2012 [6,7].

Sin embargo, en el inicio de este siglo fue posible observar en el planeta un continuo crecimiento acelerado del consumo de energía y emisiones de CO₂ [8,9]. En España, por

ejemplo, las emisiones de CO₂ de 2005 ya sobrepasaban en 30 puntos su nivel máximo permitido en el Protocolo de Kioto, se ha convertido en uno de los países industrializados donde más aumentan las emisiones [6]. Los EEUU., unas de las naciones que no ratificaron el Protocolo de Kioto, siguen liderando la lista de países que más energía consumen y está entre los que más emiten CO₂ también [8,9].

Otro hecho importante que ocurrió en este siglo en los países desarrollados es que aunque se consiguió reducir el consumo de energía para la calefacción, se tuvo al revés un continuo aumento de la utilización de sistemas de climatización hasta en edificios residenciales, que no solían utilizar. Debido en parte por el deseo de más confort y por los récords de temperatura en el verano registrados, este aumento del uso de aire acondicionado resultó en picos de consumo de energía que causó algunos problemas de abastecimiento en países del sur de Europa y también en los EEUU, como por ejemplo el colapso del sistema de energía de la California en 2002 [1].

En esta última década el aumento de la conciencia ambiental en la población estimuló algunos cambios en el mercado económico como un todo para atender esta nueva demanda preocupada con el planeta, llegando también al sector constructivo. El término “sostenible” empezó a ser usado para cualquier producto que tenga una ventaja ambiental sobre la competencia, incluso edificios. El concepto de sostenibilidad fue creado en 1987 en la *World Commission on Environment and Development* (WCED) que lo definió como: “... aquel que satisface las necesidades del presente sin comprometer la posibilidad de las futuras generaciones para satisfacer sus propias necesidades” [10].

Sin embargo, gran parte de los edificios que se titulan sostenibles son más un reclamo del mercado que una tentativa real de llegar a la sostenibilidad en la construcción. La Arquitectura Sostenible puede ser entendida como un complemento o ampliación de la Arquitectura Bioclimática pues considera el medioambiente en una visión más holística, buscando un uso racional de los recursos, generar menos residuos, crear espacios más saludables, o sea, disminuir los impactos al construir y construir con calidad socio-ambiental [2,7,11].

En el momento actual, el mundo atraviesa una de las peores crisis financiera y económica desde la Gran Depresión de 1929, y como resultado la demanda mundial de energía ha caído por la primera vez en los últimos 27 años. El consumo mundial de energía primaria (petróleo, gas natural, carbón, energía nuclear e hidroeléctrica) cayó en 1,1% en 2009, el primer descenso desde 1982 y la mayor reducción en términos porcentuales desde 1980 [8]. No obstante, se prevé que con las actuales políticas de las naciones, retomará su tendencia

al alza y su rapidez en repuntar dependerá en gran medida de la celeridad de la recuperación económica mundial [12].

Según el informe WEO 2009 (Perspectivas Energéticas Mundiales) de la Agencia Internacional de la Energía [12]: *“la recesión, al frenar momentáneamente el incremento de las emisiones de gases de efecto invernadero, facilita, en principio, la misión de transformar el sector energético ofreciendo una oportunidad sin precedente, aunque relativamente limitada, para actuar a favor de la concentración de la inversión en tecnologías de baja emisión de carbono.”*

La mayor parte de las emisiones mundiales de CO₂ y NO_x provienen de la producción tradicional y uso de la energía eléctrica [5], o sea, con el ahorro energético directamente reducimos las emisiones de los principales gases responsables del Calentamiento Global. Las principales acciones para reducir las emisiones de CO₂ son la utilización de energías renovables y la mejora de eficiencia energética de su utilización por cada sector de la economía [3,7].

Pasamos la mayor parte de nuestra vida dentro de edificios, es dentro de ellos que consumimos grande parte de la energía producida, que en termos globales llega a cerca del 30% de todo la generación [3]. Por eso el sector de la construcción tiene grandes responsabilidades en construir edificios que consuman cada vez menos energía. Es muy importante también resaltar que la vida útil de un edificio es en media entre 50 a 100 años y que todavía es muy incierta la situación energética del futuro, o sea, los proyectos de hoy tienen que ser el máximo eficientes energéticamente para construir un futuro sostenible para las próximas generaciones [3].

Es en este ámbito que la ventilación natural surge como una importante herramienta sostenible para mejorar la eficiencia energética de los edificios al evitar o minimizar el uso de climatización y equipamientos mecánicos. Además de reducir un innecesario consumo energético, la ventilación natural es el instrumento más eficiente para mejorar la calidad del aire interior en áreas urbanas, proteger la salud, y proveer confort [1].

2. ESTADO DEL ARTE

2.1. INTRODUCCIÓN

La ventilación de edificios, tanto natural como mecánica, es primordial para permitir su utilización puesto que es la responsable por remover y diluir los contaminantes del aire generados por la actividad humana o por el edificio en sí [13,14]. El objetivo principal de la ventilación es proveer en los ambientes un microclima aceptable para los ocupantes [15], y esto incluye eliminar el sobrecalentamiento de los espacios interiores y asegurar la calidad del aire [16].

Algunos autores [16-18] definen tres funciones básicas de la ventilación de edificios:

- Control de la Calidad del Aire: controlar la calidad del aire de edificios, por la dilución de los contaminantes del aire generados internamente con el aire limpio externo;
- Enfriamiento convectivo: enfriar los edificios renovando o diluyendo el aire caliente interior con el aire fresco exterior;
- Confort térmico: o enfriamiento psicológico, cuando el aire fresco externo pasa por la superficie de la piel a una velocidad suficiente para aumentar la disipación del calor de los ocupantes del edificio a través de la pérdida convectiva de calor y acelerando la evaporación.

Ventilación Natural es aquella que no utiliza energía eléctrica de ventiladores u otro equipamiento mecánico [19]. Ella es resultado de diferencias de presiones causadas por dos fuerzas naturales que pueden actuar separadamente o en conjunto [20]: el viento externo y las diferencias de temperatura entre el interior y el exterior (efecto Stack o chimenea) [21,22].

Es importante aclarar que la ventilación natural si bien es causada por las mismas fuerzas naturales es diferente de la infiltración de aire en edificios, que puede ser definida como el flujo incontrolable de aire hacia dentro o fuera del edificio a través de rendijas, imperfecciones de construcción o porosidad de los materiales del edificio [15,23].

Es posible dividir el estudio y la utilización de la ventilación natural en dos grandes temas: la ventilación para el enfriamiento y la ventilación para el control de la calidad del aire interior (o ventilación higiénica) [1,19]. Esta investigación se centrará principalmente en el primer tema. Esta separación se debe a la gran diferencia en las tasas de flujos de aire necesario para cada finalidad, como podemos ver en la Figura 2.1. La ventilación natural para

enfriamiento garantiza automáticamente las tasas mínimas necesarias para el control de la calidad del aire interior [3].

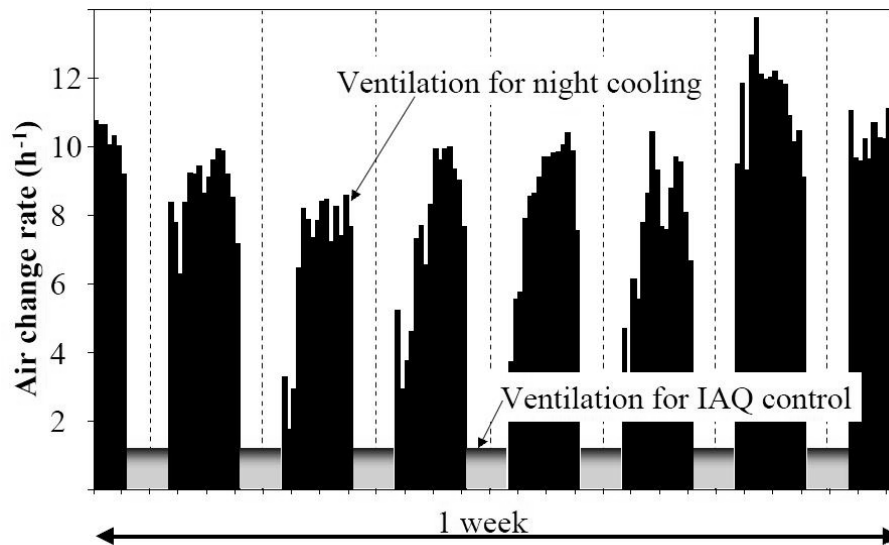


Figura 2.1: Comparación entre las tasas de flujos de los dos temas.

Fuente: GHIAUS et al, 2005 [1].

La ventilación natural es un recurso que la naturaleza nos brinda capaz de proveer confort térmico y asegurar índices de calidad del aire interior iguales o superiores que los sistemas de mecánicos para una gran variedad de regiones climáticas del mundo [3,24]. Más allá del ahorro energético y consecuentemente los beneficios ambientales asociados, su utilización en edificios tiene otras ventajas sobre la ventilación mecánica y aire acondicionado, dentro de ellos podemos poner de relieve [3,24,25]:

- bajo coste de inversión inicial, mantenimiento y operativo;
- no necesita de espacio físico en planta;
- no produce el ruido característico de mucho de los sistemas;

Es importante también destacar que algunas investigaciones y encuestas demuestran que la mayoría de las personas prefieren espacios ventilados naturalmente [3,19,26]. Una investigación con 480 personas de oficinas que cubrió todos los sectores de negocios concluyó que 89% preferían edificios que no tenían aire acondicionado [27].

Además, otros estudios han indicado que los ocupantes manifestaron menos síntomas de enfermedades en los edificios con ventilación natural frente a los edificios con ventilación mecánica [28]. Si la ventilación natural puede mejorar las condiciones ambientales interiores

y el bienestar, estas mejoras también pueden aumentar los beneficios de una empresa al reducir el absentismo de personal, la reducción de los costes sanitarios, y la mejora de la productividad de los trabajadores [29].

Sin embargo, mientras que si la ventilación natural es conceptualmente simple y la más barata opción para enfriar el edificio, es también la más difícil de controlar, ya que las fuerzas motrices, por lo tanto las tasas de flujo de aire, varían constantemente con el tiempo [19,30-32]. Para tener éxito, la ventilación natural debe ser planificada y no "simplemente suceder". Su desarrollo implica la forma de los edificios, el entorno y el clima, por eso su importancia debe ser reconocida en las etapas iniciales del proceso de diseño, antes de tomar decisiones que puedan hacerla inviable [33-36].

Un simple ejemplo de esto es un mal posicionamiento de las aberturas en relación a los vientos predominantes que puede impedir la ventilación cruzada. En la Figura 2.2 es posible ver dos posicionamientos diferentes de dos aberturas en un mismo ambiente. La primera opción induce la ventilación cruzada, en cambio la segunda no.

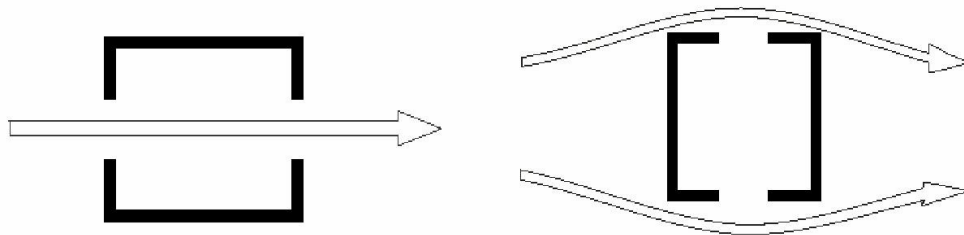


Figura 2.2: Diferentes posicionamientos de aberturas en un mismo ambiente.

Fuente: NEVES, 2006 [37].

Algunas condiciones también importantes para la utilización de la ventilación natural son:

- que los niveles de polución externa no sean mayores que los generados internamente. Aunque esta situación sea difícil de ocurrir, ella existe y necesitaría que el aire sea filtrado y límpido por equipamientos mecánicos antes de adentrar al edificio [1];
- que el nivel medio de ruido externo no esté por encima del adecuado o vuelva inapropiado al uso del edificio. Esto ya es más fácil de ocurrir en los centros urbanos y dependiendo de la situación puede ser solucionado o atenuado por diferentes técnicas de diseño específicas [38, 39];
- riesgos en cuanto a la seguridad, privacidad o conflictos con las regulaciones para la prevención de incendios debido a posibles grandes superficies de aberturas [1,3].

La ventilación natural, como toda tecnología, tiene sus ventajas y desventajas, oportunidades de aplicación y otras veces imposibilidades, pero no hay que descartarla sin antes estudiar todas las posibilidades de utilización, de preferencia desde las etapas iniciales del diseño junto con las otras técnicas pasivas para reducir el consumo de energía. El empleo de la ventilación natural podría y debería ser mucho mayor del que se hace hasta la fecha y que para esto hay que investigar, aumentar y difundir los conocimientos acerca de este tema [3]

2.2. FUNDAMENTOS FÍSICOS DE LA VENTILACIÓN NATURAL

La ventilación natural en el interior de edificios es el aire en movimiento debido a las diferencias de presión creadas a través de las distintas aberturas del edificio [3]. Como se dijo anteriormente, estas diferencias de presión son resultado del efecto separado o combinado de dos recursos disponibles libremente: el **viento** externo y las diferencias de temperatura entre el interior y el exterior, también conocido como **efecto Stack o chimenea**.

Aunque estos recursos son gratuitos, son difíciles de controlar. Por eso para lograrlo, es necesario primero comprender la física de la ventilación [40]. No obstante, el estudio de los comportamientos físicos de la ventilación natural está en constante desarrollo, por eso fue reunido los conocimientos más consagrados junto con una recopilación general del estado del arte de las investigaciones en este capítulo.

2.2.1. Ventilación conducida por el Viento

El efecto del viento sobre un edificio está influenciado directamente por su forma y la proximidad de otras construcciones vecinas. Cuando el viento incide sobre un edificio, el aire es perturbado y desviado por encima y alrededor del mismo [3, 40].

Con esto son creadas las diferencias de presión sobre la construcción. En términos generales, las presiones son más altas en la fachada que da el viento, o sea, el lado de barlovento del edificio (zona de presión positiva), y más bajo en el lado de sotavento y en el techo (zona de presión negativa o zona de succión), y así se tiende a manejar un flujo de aire dentro del edificio desde las aberturas a barlovento hacia a las que están a sotavento, como muestra la Figura 2.3 [3, 40].

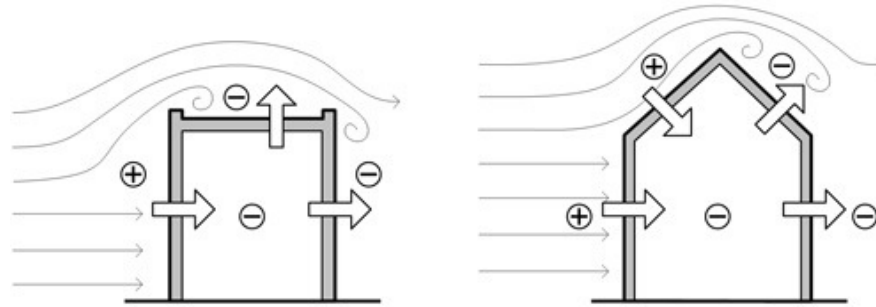


Figura 2.3: Efecto de las presiones del viento sobre los edificios.

Fuente: Internet.

La cuestión es medir cómo estas diferencias de presión varían con la forma de la construcción, dirección del viento, y la presencia de edificios cercanos [40]. Es sabido que esta diferencia de presión entre dos puntos de la fachada de un edificio determina las fuerzas que inducen el viento dentro del mismo si las aberturas están ubicadas en esos dos puntos. La presión inducida por el viento P_w es calculada por la expresión general [3,15,41]:

$$P_w = C_p \rho U^2 / 2$$

Donde C_p es el coeficiente de presión (adimensional), ρ es la densidad del aire (Kg/m^3) y U es la velocidad del viento (m/s) a la altura de referencia, usualmente la altura del edificio o de la abertura. El coeficiente C_p es en general medido en túneles de viento o calculado utilizando los métodos de la dinámica de fluidos computacional (CFD) [4].

Muchas investigaciones han intentado crear métodos precisos para calcular el C_p , pero la mayoría son resultados experimentales que determinan este coeficiente bajo circunstancias puntuales [1,3]. Puesto que la dirección y velocidad del viento varían en el tiempo como resultado de la turbulencia del viento y de los efectos de los obstáculos, el coeficiente de presión tornarse difícil de estimar en medio urbano y para edificios con formas complejas [4].

2.2.2. Ventilación conducida por el Efecto Stack (Chimenea)

En el caso del efecto Stack o efecto chimenea, la ventilación natural es resultado de la energía térmica del calentamiento solar incidente sobre la construcción que causa las diferencias de densidad en el aire y provocan las diferencias de presión [3,40].

En otras palabras, las diferencias de temperatura entre el interior y exterior de un edificio y entre los diferentes espacios dentro del edificio producen las fuerzas de empuje que conducen el flujo de aire. En contraste con el caso puramente impulsado por el viento, la presencia de estas fuerzas de empuje conduce a las variaciones de temperatura dentro del espacio.

La tendencia natural del aire caliente a ascender y acumularse hacia la parte superior de un ambiente lleva a una estratificación estable, y esto tiene una gran influencia en los patrones de flujo dentro del espacio. Esta estratificación puede dar lugar a muy diferentes configuraciones de flujo [21,40]. Lo que determina la estratificación vertical en el ambiente es la ubicación de las aberturas.

Por ejemplo, cuando el aire interno es más cálido que el aire externo, una sola abertura en la parte superior del ambiente permitirá el intercambio del aire, el caliente hacia el exterior y el aire fresco hacia el interior, como se puede ver en la Figura 2.4 (a). Al mismo tiempo, este intercambio de aire provoca una turbulencia dentro del espacio que tiende a mezclar el aire internamente, por eso este tipo de ventilación, también conocida como *ventilación por mezclado*, produce una distribución de temperatura relativamente uniforme en el ambiente [21,40].

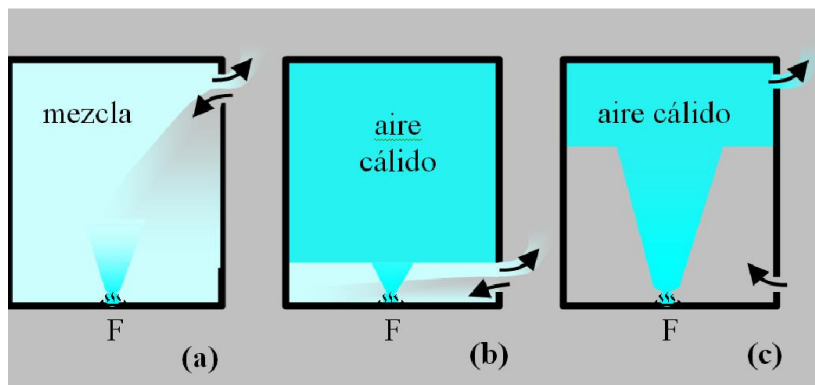


Figura 2.4: Esquemas de la ventilación de mezclado y por desplazamiento.

Fuente: THOMAS et al, 2006 [21].

En la misma situación, caso esta sola abertura se ubique en la parte inferior del ambiente habrá un intercambio pasajero hasta que el aire fresco que adentra ocupe en el espacio la altura de la parte superior de la abertura, tras lo cual la ventilación cesará, como muestra la Figura 2.4 (b). Esta configuración no es, en general, una forma eficaz de ventilación [21,40].

Ya en el caso de haber dos aberturas, una en la parte superior y otra en la parte inferior del espacio, el aire caliente interno menos denso saldrá por la abertura superior y el aire fresco externo entrará por la abertura inferior del espacio, como muestra la Figura 2.4 (c). Una configuración estable de densidad es formada entre la capa caliente en la parte superior y la capa más fría en la parte inferior, creando una variación de temperatura en espacio mayor que en la ventilación por mezclado. Este tipo de ventilación es llamada de *ventilación por desplazamiento* [21,40].

Este tipo de ventilación conduce a un flujo de aire más rápido y mayor que la ventilación por mezclado utilizando la misma área de aberturas y con las mismas diferencias de temperatura entre el espacio interior y exterior. Esto demuestra la importancia de la ubicación de las aberturas que producen los patrones de flujo del efecto Stack para la eficiencia del sistema de ventilación [21,40].

La distribución de las presiones en un edificio, siempre considerando solo el efecto Stack, o sea, sin viento, puede tener diversos patrones, como algunos enseñados en la Figura 2.5 para el caso de la temperatura interior ser mayor que la externa. El nivel de presión neutral (NPL = neutral pressure level) es la altura en la que las presiones del aire dentro y fuera del edificio son iguales. Según la Ley de la Conservación de la Masa, la masa del flujo de aire que entra en el ambiente por debajo del NPL es igual a la masa flujo de aire que sale por encima del mismo [3].

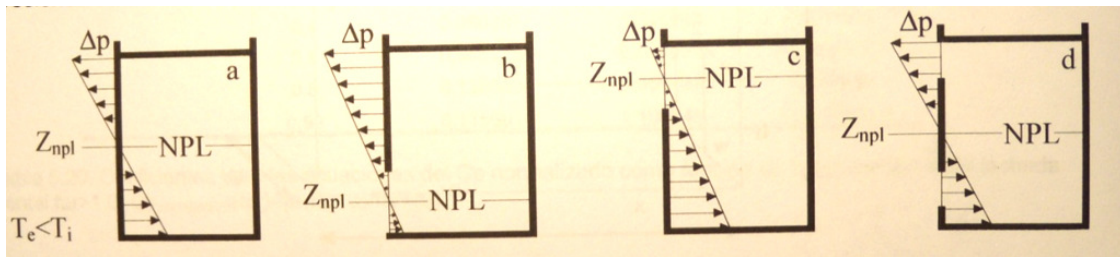


Figura 2.5: Distribuciones de las presiones Stack para diferentes posiciones de aberturas.

Fuente: YARKE, 2005 [3].

La presión Stack P_s puede ser calculada por la ecuación [15]:

$$P_s = - \rho_o g h (1 - T_o/T_i)$$

Donde T_o = temperatura del aire de referencia o externo (K); T_i = temperatura del aire interno (K); ρ_o = densidad del aire en la temperatura de referencia T_o (Kg m^{-3}); g = aceleración de la gravedad (m s^{-2}); h = diferencia de altura entre dos aberturas (m). Esta ecuación puede ser aplicada para diferentes casos prácticos envolviendo una variación lineal de temperatura a cada abertura o zona, pero si es una variación de temperatura no-lineal con la altura entonces se debe utilizar la forma integral de la ecuación [15]:

$$P_s = - g \int_0^h \rho(z) dz$$

Donde $\rho(z)$ es la densidad del aire a la altura z y h es la distancia vertical entre dos aberturas.

2.2.3. Ventilación conducida por el efecto combinado del viento y del efecto Stack

A partir de lo explicado anteriormente, las diferencias de presiones resultantes del viento y del efecto Stack producen la ventilación natural en los edificios y ellas pueden trabajar por separado o en conjunto para conducir la ventilación. En realidad, estas dos fuerzas actúan casi siempre simultáneamente en el edificio, pero ni siempre en el mismo sentido. Por eso, el flujo de aire a través de una abertura es determinado por la suma algébrica de estas dos presiones que son generadas por separado [3,15].

Si las dos presiones, del viento y del efecto Stack, tienen el mismo signo (o sentido), entonces trabajan en conjunto para aumentar el flujo de aire, pero si no, el flujo de aire se reducirá y en ciertos casos las dos presiones pueden anular una a otra y producir ningún flujo de aire a través de las aberturas [15]. Por lo tanto, estas dos fuerzas tienen que ser planificadas conjuntamente para crear un sistema de ventilación natural eficaz.

2.2.4. Flujo de aire a través de aberturas

El flujo de aire Q a través de una abertura con una dimensión libre relativamente grande, como el de una ventana estándar por ejemplo, puede ser calculado utilizando la ecuación general para flujos en orificios [4,15]:

$$Q = C_d A \sqrt{(2 \Delta P / \rho)}$$

Donde C_d es el coeficiente de descarga de la abertura (adimensional), A es el área de la abertura (m^2), ΔP es la diferencia de presión a través de la abertura (Pa) y ρ es la densidad del aire (Kg/m^3) [4,15].

El coeficiente de descarga C_d es determinado experimentalmente y es una importante fuente de incertidumbre en los cálculos de ventilación [3]. Él es una función derivada de la abertura analizada, diferencia de temperatura y velocidad del viento a través de ella [42]. Investigaciones como la de Flourentzou et al [43] determinaran algunos valores para este coeficiente, siendo esta una de las más aceptas actualmente [3,4]. Con la incertidumbre de los datos de entrada utilizados, la imprecisión de este cálculo no debe ser considerado muy importante para un modelo de ventilación natural que tiene una respuesta cualitativa correcta [3].

Calcular el flujo de aire a través de grandes aberturas es todavía una tarea más complicada. Por eso, los flujos de aire a través de aberturas en edificios ventilados naturalmente son usualmente calculados por los modelos empíricos simplificados, de red, zonal, o modelos de dinámica de fluidos computacional (CFD) [4].

2.3. MÉTODOS DE ESTUDIO PARA ESTIMAR LOS PARÁMETROS DE LA VENTILACIÓN NATURAL

Para entender el comportamiento del viento y poder calcular los parámetros de ventilación natural como flujos o caudales de aire, velocidad del aire dentro del edificio o ayudar a dimensionar las aberturas se utilizan alguno de los tres métodos principales de estudio [3]:

- Experimentos sobre modelos en escala reducida;
- Mediciones directas sobre los espacios en escala natural y tiempo real;
- Modelos de cálculos de diferentes complejidades.

Estos métodos de estudio tienen cada uno su ventaja y desventaja, y ninguno de ellos es completo o asegura resultados totalmente confiables por sí solo, por eso una evaluación más precisa sobre un problema específico de la ventilación natural requiere un abordaje simultáneo de ellos [3]. Sin embargo, en la práctica y en la mayoría de las investigaciones se suele utilizar tan sólo uno o dos de estas técnicas debido la complejidad y costes que implican esos estudios.

2.3.1. Experimentos sobre modelos

Los experimentos sobre modelos en escala reducida son generalmente realizados en túneles de viento, túneles de agua o en cámaras empleando humos o líquidos. El túnel de viento es uno de los métodos considerados más precisos para obtener datos prácticos, pues posibilita estudiar el flujo de aire en tres dimensiones, a diferencia del túnel de agua y las cámaras de humos o líquidos (Figura 2.6) que fornecen informaciones sólo en dos dimensiones [16]. Los experimentos con líquidos son basados en los criterios de similitud dinámica al aire para estudiar los flujos en los espacios [21].

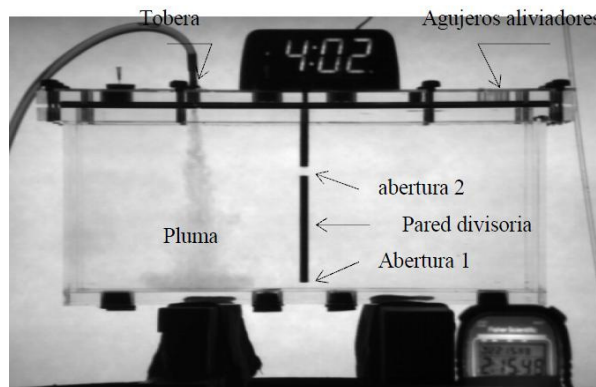


Figura 2.6: Experimento con una cámara de líquidos.

Fuente: THOMAS et al, 2006 [21].

Todos estos estudios sobre modelos tienen la ventaja de facilitar la visualización y comprensión de los patrones de flujos que son producidos en comparación con las otras técnicas, y ayudan a desarrollar las reglas de diseño necesarias para obtener sistemas de ventilación eficientes. Con ellos es posible también estimar correlaciones de velocidad del viento actuante y velocidad del desplazamiento del aire interior en distintos puntos del espacio estudiado [3,21].

2.3.2. Mediciones directas sobre los espacios

Las mediciones directas sobre los espacios en escala natural y tiempo real son hechas en el propio ambiente bajo estudio, pero generalmente es un procedimiento muy complejo y posible sólo en muy pocas oportunidades. Con estas mediciones se puede medir por ejemplo el perfil de viento que llega al sitio, los caudales de aire, las diferencias de presión y las direcciones y velocidades del viento. Estos sólo se realizan actualmente para compararlos con los resultados de estudios con otras técnicas [3,16].

2.3.3. Modelos de cálculos

Los modelos de cálculos van desde algoritmos empíricos simples hasta los modelos computacionales más sofisticados que resuelven ecuaciones complejas como de Navier-Stokes. Dependiendo del tipo de información requerida y de los datos de entrada fornecidos, muchos modelos y herramientas pueden ser usados para estimar los patrones de flujos, caudales de aire, velocidad del aire interior, dimensionamiento de aberturas, entre otros. Se suele dividir estos modelos en dos: los modelos empíricos y los modelos de CFD [3].

Modelos Empíricos

Los modelos empíricos no son sólo métodos de cálculos numéricos, más bien son tablas de datos tabulados y guías prácticas para ayudar en el momento del diseño del edificio ventilado naturalmente. Son muy útiles en esta fase preliminar del diseño pues pueden ofrecer una estimación rápida de los parámetros donde todavía es posible cambiar la forma, orientación o parte del proyecto. En general, ellos están basados en fórmulas simplificadas deducidas tanto de la teoría como de manera experimental, por eso no pueden ser considerados de validez general, siendo que deben ser usados dentro de sus límites [3].

Modelos de CFD

Los *modelos de CFD* o Dinámica de Fluidos Computacional, son las herramientas de cálculo más avanzadas puesto que resuelven simultáneamente las ecuaciones de conservaciones de masa, energía y momento, basadas en las complejas ecuaciones de

Navier-Stokes. Los modelos de CFD realizan simulaciones como si fuera un experimento en un laboratorio virtual, utilizando un modelo matemático y algoritmos que describan los procesos similares a lo que pasaría en la realidad, dando como resultados entre otros, campos de distribución de velocidad del aire y temperatura, presiones, los patrones de flujos [3,16].

2.4. MÉTODOS DE VENTILACIÓN NATURAL

Las dos fuerzas que conducen la ventilación natural en edificios, el viento y el efecto Stack o chimenea, poden ser utilizadas para diferentes métodos de ventilación natural. Los tres principales y más usuales son: ventilación unilateral, ventilación cruzada y ventilación por efecto chimenea (Stack) [4,15,18,44]. En un único edificio ventilado naturalmente es posible encontrar una combinación de todos estos métodos fundamentales.

2.4.1. Ventilación Unilateral

Esta suele ser la forma más simple de ventilación natural de un edificio y atiende un solo ambiente, por lo tanto proporciona una solución de ventilación local [18,44]. La ventilación unilateral consiste de una simple abertura(s) como una ventana o un dispositivo de ventilación en una sólo pared donde el aire externo entra en la habitación, y el aire interno sale por la misma abertura(s) o otra(s) situada en la misma pared, pero a una altura diferente [15,44], como muestra la Figura 2.7.

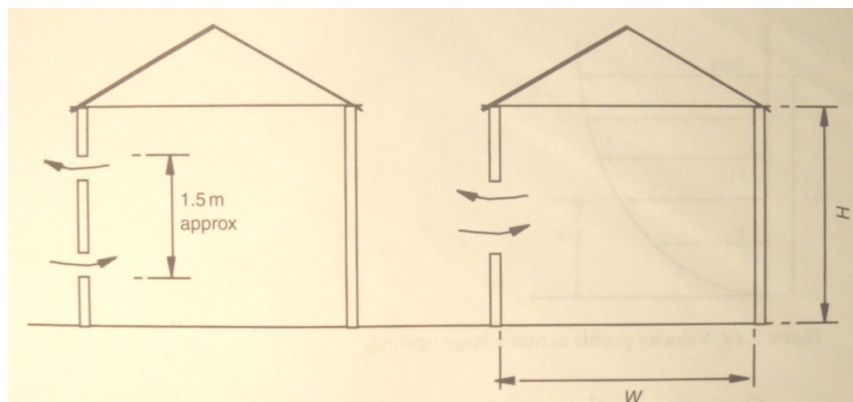


Figura 2.7: Ventilación unilateral.

Fuente: AWBI, 2006 [15]

En este tipo de ventilación, cuando se tiene solamente una abertura el flujo de aire a través de ella se debe más al viento que al efecto chimenea, particularmente en pequeñas aberturas. Cuando se tiene más de una abertura en la misma pared en diferentes alturas, el efecto chimenea puede incrementar el flujo de aire además del viento [15]. En la ventilación unilateral las dos fuerzas motrices para la ventilación tienden a ser relativamente pequeñas y muy variables [18].

En comparación con las otras alternativas, ella ofrece la solución de ventilación natural menos atractiva, sin embargo, en algunos casos se presenta como la única solución y suele ser común en edificios de oficinas [18]. Se recomienda para la ventilación unilateral la utilización de ventanas con área de un vigésimo del área de la habitación, con altura de 1.5m y una profundidad máxima de la habitación de 2.5 veces la altura de piso a techo [45].

2.4.2. Ventilación Cruzada

La ventilación cruzada sucede cuando el aire exterior entra por una o más aberturas situadas en un lado del ambiente o edificio y sale por una o más aberturas situadas el otro lado del mismo [15], como muestra la Figura 2.8. Ella suele proporcionar mayores velocidades de flujo de aire que la ventilación unilateral, sin embargo depende directamente de la dirección del viento e intensidad [4,44].

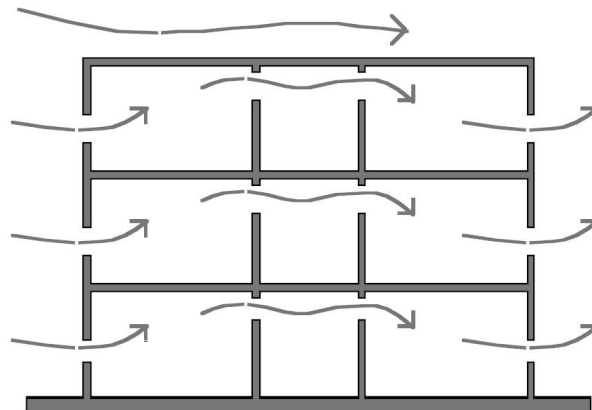


Figura 2.8: Ventilación cruzada.

Fuente: EMMERICH et al, 2001 [18]

Como ya se ha mencionado anteriormente, el viento incidente sobre el edificio tiende a inducir presiones positivas en la fachada a barlovento y negativas en el lado a sotavento, creando así una diferencia de presión a través de la sección del edificio que conduce el flujo de aire a cruzar el espacio [4]. Por eso, en este método de ventilación el flujo de aire es

principalmente conducido por la fuerza del viento, y el efecto chimenea solamente se vuelve importante cuando hay una diferencia de altura significativa entre las aberturas de entrada y salida de la ventilación [15].

En este método es posible utilizar una gran variedad de tipos de abertura, desde las pequeñas hasta grandes ventanas o puertas, pues el aire “barre” el espacio y tiene gran penetración en el edificio, sin embargo se debe tener en cuenta que el tamaño de las aberturas influencia directamente el flujo de aire [3,15]. La ventilación cruzada es indicada en espacios con una profundidad de 2.5 hasta 5 veces la altura de piso a techo [15]. Es más común su utilización en edificios residenciales, aunque en los últimos años se puede encontrar cada vez más su aplicación en edificios de oficinas [4].

2.4.3. Ventilación por efecto Chimenea

Ventilación por efecto chimenea es aquella, como el propio nombre ya lo dice, que es conducida principalmente por el efecto chimenea (o efecto Stack), o sea, el aire interno más cálido tiende a ascender y salir por una abertura superior, mientras el aire fresco externo tiende a entrar por las aberturas inferiores del edificio (Figura 2.9) [4].

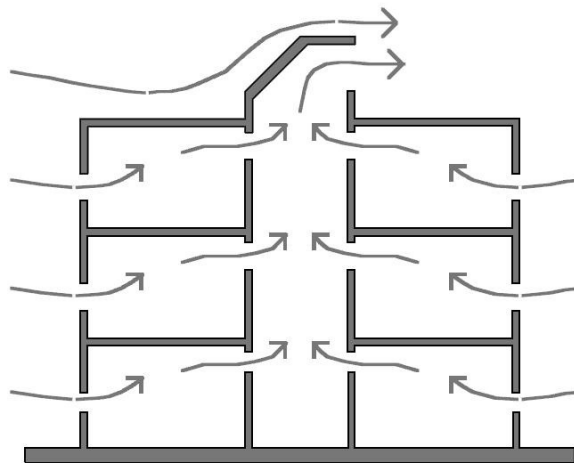


Figura 2.9: Ventilación por efecto chimenea.

Fuente: EMMERICH et al, 2001 [18]

Las presiones del efecto chimenea varían en función de la diferencia de altura entre la abertura inferior y superior, y de la diferencia de temperatura entre el interior y exterior. Cuanto mayor sea estas diferencias, mejor para conducir el flujo de aire por el efecto chimenea. Por eso, la ventilación sólo por efecto chimenea no es muy adecuada en el

verano o para locales de clima cálido donde la diferencia de temperatura entre interior y exterior es pequeña [4,15].

No obstante, hasta el más mínimo viento induce la distribución de la presión sobre la envolvente del edificio, que también actuará para conducir el flujo de aire, por eso tiene que ser considerado [18]. La correcta localización de la abertura de salida del aire en el sistema es esencial, pues la presión del viento puede asistir, reducir o reverter el efecto chimenea cuando, por ejemplo, fuerza el aire adentrar por donde debería salir [1,15]. De hecho, los efectos del viento pueden ser más importantes que los efectos de flotación en sistemas de ventilación por efecto chimenea, con lo que un exitoso diseño buscará maneras de hacer el máximo provecho de ambos [18].

Unos de los sistemas de ventilación por efecto chimenea más comunes son los conductos de aire en edificios que suelen atender a los baños. Bien planeado, la presión negativa (succión) en la cobertura del edificio generada por el viento incrementa el efecto Stack y provoca grandes flujos de aire en el conducto. Otra utilización cada vez más creciente de este método es en edificios con atrio central común, donde este efecto de succión descrito puede ser incrementado con el calor solar incidente y ser aprovechado para crear ventilación a todos los ambientes alrededor del atrio con relativa independencia de la dirección del viento, como se puede ver en el ejemplo de la Figura 2.10 [4,15].

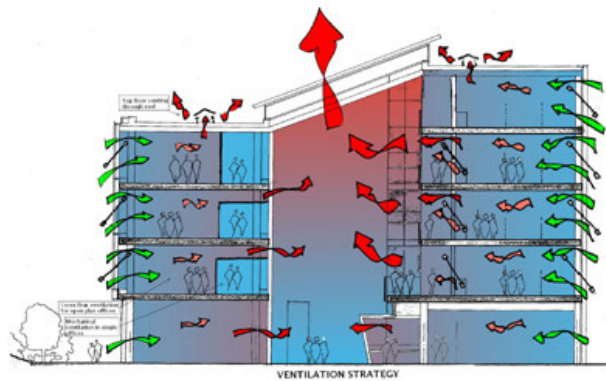


Figura 2.10: Ventilación por efecto chimenea en un atrio.

Fuente: Internet.

Siendo así, en condiciones adecuadas y con un diseño apropiado, la ventilación por efecto chimenea utilizando conjuntamente el efecto Stack y las presiones generadas por el viento, puede superar la gran limitación de la simple ventilación cruzada y atender a las necesidades de edificios que requieren grandes flujos de aire y no podían ser atendidos solo con los otros métodos de ventilación natural [15]. Esta ventaja ha hecho que este método

sea el más utilizado recientemente en edificios comerciales, creando un gran número de dispositivos específicos para asistirlo [4].

2.4.4. Combinación de los tres Métodos

A menudo, los tres métodos son utilizados al mismo tiempo en un único edificio para tratar las muchas necesidades de ventilación [4], como muestra la Figura 2.11.

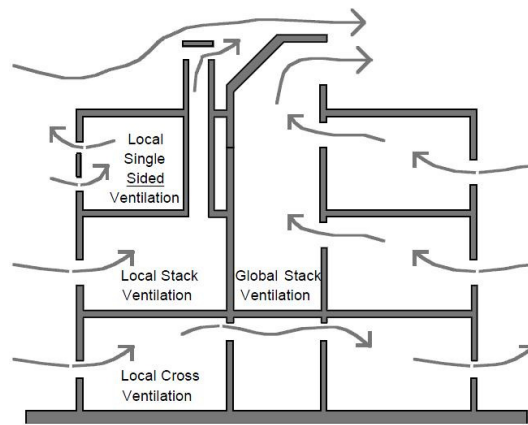


Figura 2.11: Combinación de los tres métodos.

Fuente: EMMERICH et al, 2001 [18]

2.4.5. Aplicaciones de los Métodos Fundamentales

Existen otras estrategias de ventilación natural conocidas que son basadas en estos tres métodos fundamentales descritos, tales como:

Ventilación inducida por el sol

Muchas veces en las ciudades es posible encontrar situaciones donde la ventilación por efecto chimenea diseñada para utilizar tanto las presiones del viento cuanto del efecto Stack no es factible. Esto ocurre, por ejemplo, en casos donde no hay una diferencia significativa entre la temperatura interna y externa, o cuando la velocidad del viento es insuficiente para el sistema. En estas situaciones, la ventilación inducida por el sol puede ser una alternativa [4,15].

Esta estrategia consiste en aumentar el efecto chimenea con el calentamiento solar del aire del sistema, resultando en una diferencia de temperatura mayor que si tuviera el sistema convencional por efecto chimenea, aumentando así los flujos de aire [4,15]. Usualmente las principales formas de utilizar esta estrategia son: paredes trombe, doble fachadas, chimeneas solares (Figura 2.12), y cubiertas o techo solares [4].

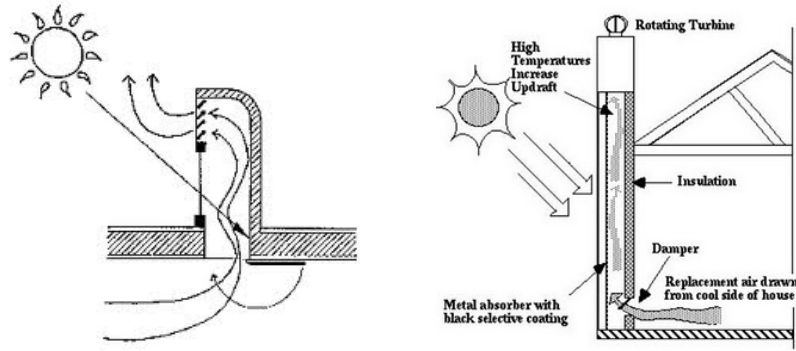


Figura 2.12: Ejemplos de chimeneas solares.

Fuente: Internet.

Ventilación por efecto chimenea equilibrado

Otra dificultad en medio urbano es conseguir velocidades de viento adecuada a bajas altitudes, así como pueden existir problemas de ruido excesivo o baja calidad de aire cuando se tiene aberturas de entrada de aire de un sistema en el nivel de la calle. Por eso, la ventilación por efecto chimenea equilibrado, una solución del antiguo Oriente Medio, puede ser necesaria [4].

En este sistema el aire es capturado por una abertura, u otro dispositivo específico, en niveles altos donde la velocidad del viento es mayor y el aire es menos contaminado, y por ser más frío y denso que el aire interior, desciende por medio de un ducto creando flujos de aire en el edificio hasta salir calentado por otra abertura en un nivel más alto por el efecto chimenea [4], como se puede ver en la Figura 2.13.

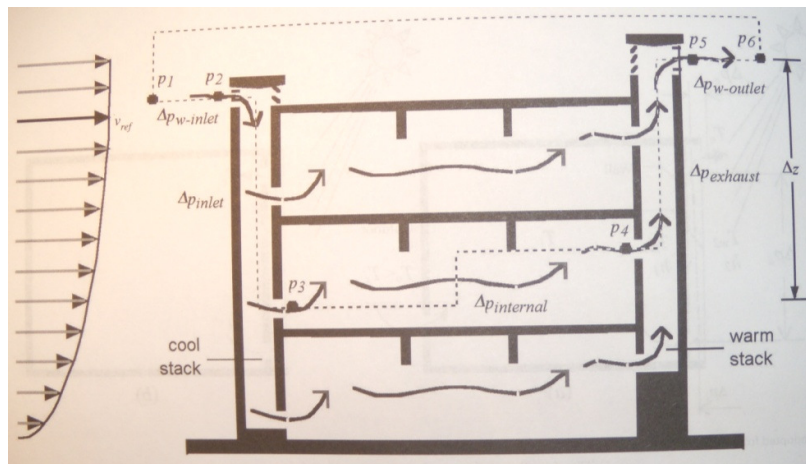


Figura 2.13: Ventilación por efecto chimenea equilibrado.

Fuente: SANTAMOURIS, 2006 [4].

Una mejora del sistema de ventilación por efecto chimenea equilibrado, también utilizado en el antiguo Oriente Medio y Asia Oriental, consiste en añadir el enfriamiento por evaporación de agua en la entrada del aire. El agua es rociada en la entrada del aire del sistema y enfría y aumenta la densidad del mismo, aumentando así las diferencias de presiones que producen el efecto chimenea [4]. Sin embargo esta estrategia ya no es indicada para climas húmedos.

Fachada de Doble piel

Como ya se ha mencionado, la doble fachada puede ser utilizada como estrategia de ventilación inducida por el sol, no obstante al revés puede ser utilizada también en un sistema de ventilación por efecto chimenea balanceado. Más allá de estas ventajas, la fachada de doble piel puede actuar como una zona intermedia entre el clima interno y externo, reduciendo las pérdidas de calor en invierno y las ganancias de calor en el verano.

La doble fachada es un sistema compuesto básicamente de una pared normal de hormigón combinada con una estructura externa de vidrio. Esta solución puede también eliminar los problemas de seguridad de la ventilación natural, proteger las aberturas de lluvias y de las altas presiones causadas por el viento en edificios altos, y ayudar a reducir la polución sonora externa [4,38].

2.5. VENTILACIÓN NATURAL Y EFICIENCIA ENERGÉTICA. ESTRATEGIAS

La eficiencia energética de un edificio empieza desde las etapas iniciales del diseño, aprovechando al máximo los recursos naturales para sistemas pasivos de calefacción y/o enfriamiento interior. De entre estos recursos podemos destacar el sol y la ventilación natural como fundamentales [3,46].

Cuando hablamos de ventilación natural para mejorar la eficiencia energética de un edificio, significa utilizar la ventilación para enfriamiento contribuyendo así para reducir o eliminar el consumo energético para esta finalidad [4]. Este enfriamiento pasivo por ventilación natural suele ser dividido en la literatura en dos tipos de estrategias [18]:

- Enfriamiento directo: que puede ser tanto para de las personas, enfriamiento psicológico o confort térmico, como del edificio en sí, enfriamiento convectivo;
- Enfriamiento indirecto: enfriar indirectamente el interior de los edificios por el pre-enfriamiento térmico de componentes masivos de la estructura del edificio o de un sistema de almacenamiento térmico con el aire fresco externo durante la noche.

La elección de la mejor estrategia de ventilación natural para enfriamiento dependerá de un análisis de la situación del edificio bajo estudio, siendo que el clima es uno de los factores principales. Tanto las técnicas para enfriamiento directo cuanto indirecto dependen de ciertos parámetros básicos climáticos para garantizar su eficiencia, siendo estos parámetros un poco diferentes para cada técnica [3,4].

2.5.1. Ventilación natural para enfriamiento directo

El enfriamiento directo por ventilación natural une el enfriamiento convectivo del edificio con el enfriamiento psicológico de las personas porque ambos son alcanzados de manera integrada y simultánea. Al enfriar el cuerpo humano con la velocidad del aire sobre la superficie de la piel, el aire que adentra está, al mismo tiempo, enfriando el edificio al renovar o diluir el aire caliente interior con el aire fresco exterior. Esta estrategia de ventilación tiene por objetivo principal proveer confort a los ocupantes del edificio, por eso también es llamada de ventilación de confort [3,18].

Al introducir el aire fresco externo en el interior del edificio a una cierta velocidad se consigue un directo enfriamiento de los ocupantes por la disipación de calor a través de la pérdida convectiva y la aceleración de la evaporación de la piel. Por eso cuando la humedad es alta, mayores velocidades del aire minimizan la incomodidad que se siente con la piel húmeda por la dificultad de transpiración. No obstante, para la ventilación de confort se requiere que la humedad relativa no supere los 90% en ningún momento del día [3].

Por lo tanto, las personas toleran más altas temperaturas que las usuales cuando están sometidas a flujos de aire más veloces, dado que cuanto más alta es la velocidad, mayor el efecto de enfriamiento del cuerpo humano [4]. La velocidad máxima interior del aire considerada aceptable para edificios de oficina ventilados naturalmente puede llegar a 2,5 m/s según algunos autores, siendo este límite debido a los problemas prácticos generados en velocidades más altas, como, por ejemplo, papeles volando sobre mesas o desarreglo de peinados [4,47].

Sin embargo, para asegurar los niveles de confort de los ocupantes en los edificios ventilados naturalmente se suele utilizar estándares y normativas de confort vigentes. El método más conocido y más aceptado mundialmente es el propuesto por Fanger en 1972, en el que fueron basados posteriormente los estándares internacionales, como de la ISO y de la ASHRAE. Pero este método fue hecho para edificios bajo la condición de estado estacionario, o sea, con temperatura constante. No obstante, en los edificios ventilados naturalmente la temperatura interna no es constante, y está siempre en libre fluctuación así como la externa [4].

Muchas investigaciones, desde los años 70 también, vienen demostrando diferencias entre los patrones de confort encontrados y del propuesto por Fanger, particularmente en países de climas más extremos. Estos estudios crearon la *teoría del confort adaptativo*, la cual dice que el clima externo influye en los patrones de confort interior [26]. Las personas aceptarían temperaturas interiores mayores o menores que las previstas por el modelo de Fanger por varios factores, como adaptación al clima o por tener acciones para adaptarse a él, como, por ejemplo, sacar o poner un jersey [26,48].

Basados en estos estudios y en la necesidad de un estándar para edificios en condición de libre fluctuación de temperaturas, como los ventilados naturalmente, Brager y de Dear [49] hicieron una grande investigación con 160 edificios en todo el mundo y crearon un nuevo modelo llamado de Estándar de Confort Adaptativo (*Adaptive Comfort Standard*) en 1997. Este modelo fue propuesto para ASHRAE (*American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers*) y fue acepto para integrar el Estándar 55 que trata del confort para ocupantes de edificios, que fue revisto y paso a entrar en vigor 2004 [1,4,47-50]. En la Figura 2.14 se muestra este nuevo modelo adaptativo.

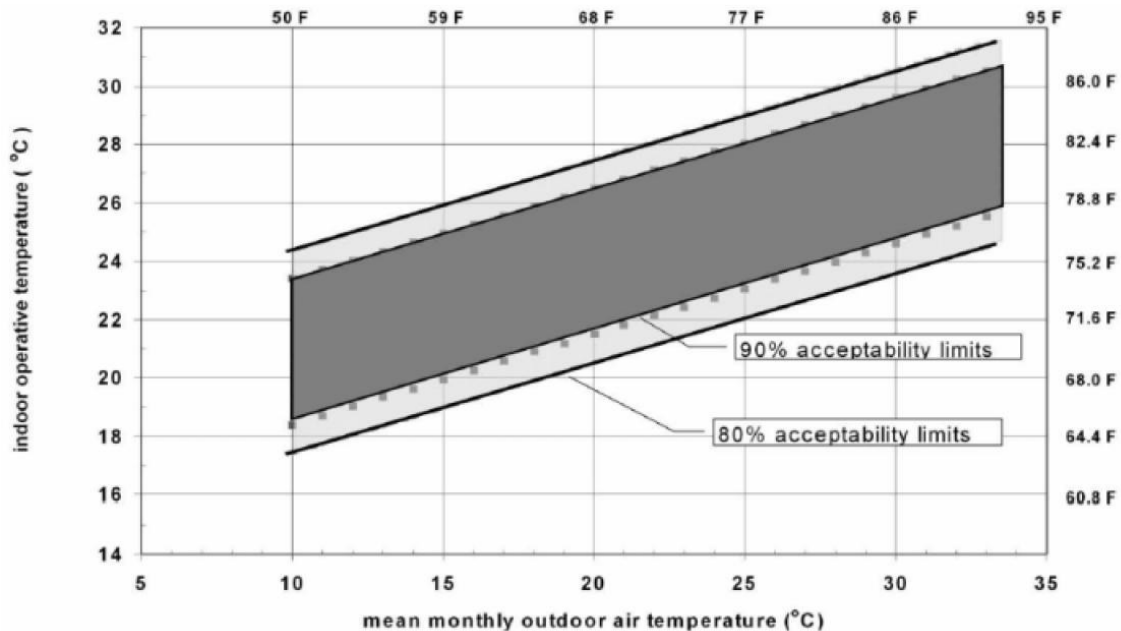


Figura 2.14: Estándar de Confort Adaptativo ASHRAE 55.

Fuente: BRAGER y DE DEAR, 2001 [49].

En este nuevo modelo de confort para edificios ventilados naturalmente, se puede ver que los límites de confort internos varían directamente con la temperatura externa. Con la media mensual de las temperaturas exteriores del lugar es posible saber los límites de temperatura

operativa interior de confort para 80% y 90% de las personas, y con esto es más fácil prever cuando es posible la utilización de la ventilación natural para confort. Estos parámetros son válidos para actividades ligeras como de una oficina, con tasa metabólica de hasta 1.2 Met (1 Met= 58 W/m²) y donde sea posible escoger la vestimenta, es decir, no hay la necesidad de utilizar uniformes no adaptados al clima por los ocupantes del edificio [47,49,50].

La aceptación de este nuevo modelo por la ASHRAE está de acuerdo con los numerosos estudios realizados sobre el tema, que muestran que los ocupantes de edificios ventilados naturalmente tienen menos expectativas de temperaturas constantes y son menos críticos a esas variaciones que los usuarios de edificios climatizados. Estas personas tienden a adaptarse al clima, usando una vestimenta adecuada, cambiando de actividad, o abriendo más la ventana por ejemplo [3,4]. Más allá de mejorar el confort en edificios con ventilación natural, este nuevo estándar representa un notable ahorro de energía para enfriamiento, especialmente en el verano [1,4].

2.5.2. Ventilación natural para enfriamiento indirecto

La estrategia de enfriamiento indirecto por ventilación natural en edificios, al revés del enfriamiento directo de las personas, consiste en enfriar indirectamente el interior de los edificios a través de la introducción de aire fresco durante las noches de verano (cuando la temperatura externa es inferior a la temperatura interna) para retirar el calor del interior y principalmente el que se almacena en los elementos estructurales del edificio, por esto esta estrategia es más conocida como ventilación nocturna o enfriamiento nocturno [51].

Los sistemas de ventilación nocturna pueden todavía ser subdivididos en directos e indirectos. Sistemas directos son aquellos en que el aire fresco es introducido y hecho circular por los ambientes del edificio naturalmente o de manera mecánica, para retirar el calor que está almacenado en la masa estructural y en los elementos opacos del edificio como paredes, divisiones internas y pisos, que tienen que estar expuestos para esto, luego se debería evitar el uso de falso suelo o techo [3,4, 51].

En los sistemas de ventilación nocturna indirectos, se enfría un medio de almacenamiento térmico que funciona como acumuladores de calor durante el período diurno, como puede ser un material de cambio de fase (PCM – *Phase Change Material*) por ejemplo, que suelen estar en una losa cubierta por un falso suelo o techo, por eso tiene siempre que ser ventilado de manera mecánica [4,51]. Los sistemas de ventilación nocturna directo e indirecto pueden ser utilizados de forma conjunta también. Sin embargo, los sistemas directos son más usuales y suelen ser más baratos que los indirectos [1].

La ventilación nocturna al retirar el calor interior y de la masa térmica del edificio acumulado contribuye a reducir la temperatura interior del edificio en el día siguiente, básicamente de cuatro maneras [52]:

- Reduciendo el pico de temperatura del aire;
- Reduciendo la temperatura del aire a lo largo del día, en particular por las mañanas;
- Reduciendo las temperaturas de las losas;
- Creando un lapso de tiempo entre las temperatura máximas externas e internas.

Por lo tanto, mejora el confort térmico de los ocupantes del edificio ventilado naturalmente, y cuando es aplicada en edificios climatizados reduce la carga de refrigeración diaria, así como el lapso de tiempo creado reduce el pico de la carga de enfriamiento. Esto permite ahorrar no solo en el consumo de energía, sino también en el coste de instalación al utilizar un equipamiento de menor potencia [3,51]. El enfriamiento nocturno es particularmente apropiado para edificios de oficinas ya que estos no suelen ser ocupadas por las noches, no obstante también es una buena solución para edificios educativos, comerciales y gubernamentales [3,52].

La eficiencia de la ventilación nocturna depende principalmente de 3 factores: de la temperatura y del flujo del aire externo introducido en el edificio durante el periodo nocturno; de los patrones del flujo del aire distribuido en el edificio puesto que determina la “calidad” de la transferencia de calor entre el aire y la masa térmica; y de la inercia o capacidad térmica de los medio de almacenamiento [51]. Para mejorar la eficiencia del sistema es adecuado evitar al máximo las ganancias de calor tanto externa como interna, a través, por ejemplo, de aislamientos térmicos y protección solar, y equipamientos eficientes [1,3].

La ventilación nocturna es indicada para países de clima moderado donde hay una variación diaria de temperatura significativa, es decir, con temperatura nocturnas muy inferiores a las diurnas, pero no tan frías a punto de crear discomfort en el otro día [1,4,26]. La variación media de temperatura diaria adecuada es igual o superior a 10°C y la humedad relativa máxima inferior a 90% [3]. Se han realizados muchas investigaciones en muchos países (ver por ejemplo [51-58]) y en particular en Europa, tanto en países del norte como el Reino Unido como también del sur como la Grecia, que comprueban la eficiencia de la ventilación nocturna para proporcionar confort o reducir el consumo de energía.

Un estudio realizado en 2006 por Artmann et al. [59] analizó el potencial climático en toda Europa de esta estrategia, y demostró que en todo el Norte su potencial es más significativo, y en la Europa Central, Oriental y incluso algunas regiones del sur de Europa, el potencial climático de enfriamiento sigue siendo importante, pero debido a las propiedades inherentes estocásticas de los patrones meteorológicos, una serie de noches más cálidas pueden

ocurrir en algunos lugares, donde sólo el enfriamiento por la ventilación nocturna no sea suficiente para garantizar un confort térmico. En estos casos, aunque sean en corto periodos de tiempo, los sistemas de enfriamiento serán necesarios.

2.6. SIMULACIÓN ENERGÉTICA Y CFD

La crisis del petróleo de los años 70 ha hecho despertar la preocupación con el consumo de energía en muchos sectores de la economía, y dentro del sector de la construcción una de las iniciativas para reducir su consumo fue también la creación de herramientas de simulación energética, que tenían como objetivo auxiliar ingenieros y arquitectos a dimensionar adecuadamente los equipos de climatización, desarrollar estudios de rehabilitaciones y mejorar la eficiencia energéticas de edificios [60].

La creación de estas herramientas de simulación energética representó un gran avance en la evaluación del comportamiento energético de edificios ya que esto es una tarea muy compleja que envuelve una gran cantidad de variables interdependientes y conceptos multidisciplinarios. Los modelos físicos computacionales permiten la simulación del comportamiento térmico y energético de edificios en diferentes escenarios. Durante los años siguientes, el continuo avance tecnológico de los ordenadores permitió el desarrollo de programas cada vez más modernos y complejos [61].

Estas herramientas surgieron principalmente en los EEUU y unas de las pioneras fueron los programas BLAST y DOE-2 desarrollados a finales de los años 70 e inicio de los años 80 [60]. Estos programas son la base de uno de los software más avanzado, confiable y utilizado hasta la fecha [62], el programa EnergyPlus desarrollado por el Departamento de Energía de los Estados Unidos (DOE – *U.S. Department of Energy*) en sociedad con otros laboratorios.

El EnergyPlus es un programa de simulación de análisis energética y cargas térmicas que con base en la descripción introducida del edificio como la constitución física, localización, orientación, los correspondientes sistemas mecánicos entre otros, calculará las cargas de calefacción y refrigeración necesarias para mantener el control térmico configurado, el consumo energético del edificio, así como otros detalles necesarios para comprobar que la simulación está funcionando como el edificio construido lo haría [60].

Sin embargo, debido a la complejidad de las herramientas más avanzadas de simulación como el EnergyPlus, que requieren un alto grado de experiencia para operar con éxito, ellas acaban siendo poco utilizadas por la mayoría de los arquitectos e ingenieros, siendo más

empleadas en centros de investigación [61]. Para intentar solucionar este problema, muchos programas con una interfaz gráfica más amigables fueron creados utilizando como motor de cálculo estas herramientas de simulación, dejando así más accesible su uso a los profesionales sin perder la calidad de los resultados obtenidos.

De entre los varios programas de interfaz gráfica que trabajan en conjunto con el EnergyPlus, el programa DesignBuilder fue escogido para ser empleado en este trabajo debido a ser uno de los más utilizados en investigaciones y trabajos sobre eficiencia energética, además de proporcionar todas las herramientas necesarias para el estudio de la ventilación natural y ya tener un módulo integrado para simulaciones de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) ambos necesarios para realización de esta investigación.

Creado en el Reino Unido, el DesignBuilder trabaja totalmente integrado con el EnergyPlus y es considerado un producto maduro que ofrece entrada flexible de geometría y con amplias bibliotecas de materiales y plantillas [63]. El programa también cuenta con procedimientos de control de calidad que aseguran la exactitud de los resultados en comparación con el motor de cálculo EnergyPlus independiente, siendo probado en los análisis comparativos del Método Estándar BESTEST / ASHRAE STD 140.

El CFD es considerado una herramienta de uso muy especializado, sin embargo el programa DesignBuilder ha conseguido dejar el proceso de modelado más simplificado, sin comprometer la precisión y fiabilidad de los resultados de los análisis [64]. El CFD del programa se basa en el método de volúmenes finitos. El método consiste en la solución de un conjunto de ecuaciones en derivadas parciales (PDEs - *Partial Differential Equations*), que describe el transporte de cantidades de momento, energía y turbulencias.

$$\underbrace{\frac{\partial}{\partial t}(\rho\phi)}_{\text{Transient}} + \underbrace{\text{div}(\rho u\phi)}_{\text{Convection}} = \underbrace{\text{div}(\Gamma \text{ grad } \phi)}_{\text{Diffusion}} + \underbrace{S}_{\text{Source}}$$

Equation	Variable
Momentum	u, v and w velocities
Energy	temperature
Turbulence KE	turbulence kinetic energy
Turbulence Diss	dissipation rate of turbulence kinetic energy

Figura 2.15. Ecuación de momento en derivadas parciales.

Fuente: DesignBuilder [64].

Las PDEs se convierten en un conjunto de ecuaciones algebraicas simultáneas. El espacio en que los cálculos se llevarán a cabo primero se divide en una serie de células rectilíneas adyacentes que no se superponen, las que se conocen como la red de volúmenes finitos

(Figura 2.15). Las ecuaciones algebraicas se establecen para cada célula de la cuadrícula y el conjunto de ecuaciones es resuelto usando un método numérico [64].

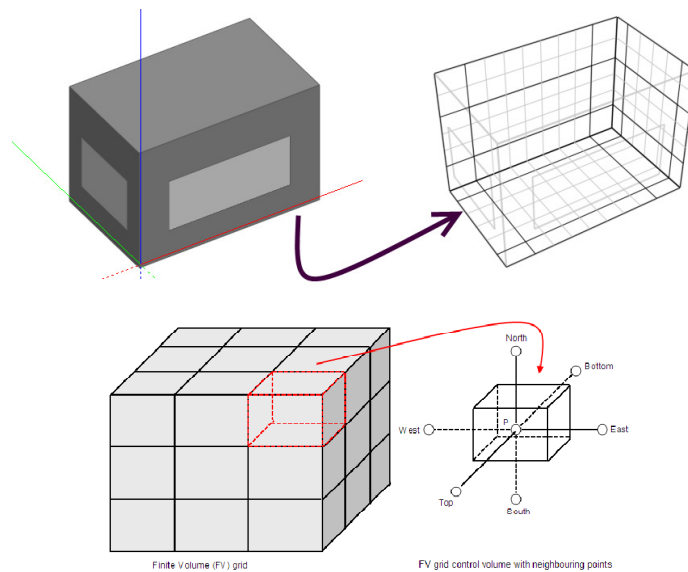


Figura 2.15: Red de volúmenes finitos.

Fuente: DesignBuilder [64].

Los resultados de estos cálculos son las temperaturas, las velocidades y otras propiedades de los fluidos a través de la región del espacio. El DesignBuilder permite que los resultados de la simulación energética con el EnergyPlus se utilicen automáticamente para definir las condiciones de contorno para un análisis CFD, resolviendo así un problema común de otros programas de CFD que necesitan de esta configuración por trabajar en separado de la herramienta de simulación energética.

Según Zhai y Chen [65,66], la simulación energética y el CFD son herramientas complementarias para una evaluación completa de un edificio, pues mientras la primera predice el comportamiento térmico de la construcción, la segunda calcula las características detalladas del flujo de aire. La integración de los dos tiene ventajas sobre los programas individuales y producen resultados más precisos y completos, ya que pueden proporcionar las condiciones complementarias de límites entre ellos y eliminar las hipótesis primarias necesarias por el uso en separado.

Las herramientas de simulación son tan útiles para trabajos de investigación como este cuanto para auxiliar a los diseñadores a evaluar las diferentes soluciones de proyecto antes mismo de la ejecución del edificio, ya que actualmente se tiene cada vez más retos para proporcionar una alta calidad al espacio construido: normas de construcción más exigentes, optimizar costos, reducir el consumo energético y los impactos ambientales, etc. [61,64].

3. METODOLOGÍA

La metodología utilizada en este trabajo fue la Empírico-analítica a través de una investigación tanto cualitativa cuanto cuantitativa para poder llegarse al resultado pretendido.

La primera parte de este estudio constó de una investigación cualitativa donde se realizó una recopilación de informaciones a través de la bibliografía existente sobre el tema y de la base de datos científicos a nivel nacional e internacional para así conseguir situarse en el estado del arte de los estudios sobre la ventilación natural en edificios aplicada para la eficiencia energética.

Después de escogido el edificio objeto de estudio, la segunda y tercera parte del trabajo constó de una investigación cuantitativa, donde primero se realizó un análisis del edificio por medio de mediciones in situ para conocer su funcionamiento y su eficacia en proporcionar confort a los usuarios en el período de verano en Barcelona. En esta etapa se hicieron mediciones en el interior del edificio de temperatura, humedad relativa del aire, niveles de CO₂ y de velocidad del aire y de flujos en cerramientos. En el entorno del edificio fue medida también la velocidad del aire exterior. Esta etapa ocurrió durante los meses de verano de 2010: mayo, junio y julio.

La tercera parte del trabajo fueron las simulaciones computacionales utilizando el programa DesignBuilder para estudiar las diferentes estrategias de ventilación natural escogidas para reducir el consumo energético del edificio objeto de este estudio. Al final de esta etapa se seleccionó la mejor opción para el caso estudiado y se hizo un análisis más profundizado con la herramienta CFD del programa. Por último, utilizando también la mejor opción escogida se hicieron simulaciones en otros dos entornos climáticos diferentes del de Barcelona, para investigar las diferencias entre las eficacias de la ventilación natural en proporcionar confort y reducir el consumo energético bajo la influencia del clima.

3.1. EDIFICIO OBJETO DE ESTUDIO

El edificio escogido para esta investigación fue la nueva Biblioteca de la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Barcelona (ETSAB) por reunir los criterios necesarios para la realización de este trabajo. Al ser un edificio de la Universitat Politècnica de Catalunya fue posible tener un acceso fácil a sus instalaciones y permiso para hacer las mediciones in situ,

registros fotográficos y utilización de imagen. El reportaje fotográfico puede ser visto en el Anexo I de este trabajo.



Figura 3.1: Biblioteca de la ETSAB.

Fuente: El autor.

El hecho de ser una construcción reciente (inaugurada en mediados de 2009) también fue un punto importante, puesto que su estructura está más actualizada con las nuevas tecnologías de construcción (como aislamientos mejores) que proporcionan un condicionamiento y una adaptación mejor del edificio al clima, factor necesario para aumentar la eficiencia de la ventilación natural en el verano, además de tener sus proyectos y planos ya digitalizados, ayudando así a la creación del modelo computacional del mismo.

Su dimensión relativamente pequeña y su forma simple facilitan la modelación tridimensional y agilizan los cálculos de las simulaciones, en particular de CFD que es la más compleja, y exige más tiempo y mayores recursos del ordenador. Por último, su amplio espacio interno para lectura sin compartimentaciones y los huecos en la losa de la planta baja haciendo también más interesantes las simulaciones CFD para analizar el comportamiento y patrones de flujos del aire en su interior.

3.1.1. Descripción del Proyecto

El edificio objeto de este estudio fue diseñado por los arquitectos Jaume Sanmartí y Alejandro Falcones de Sierra, tiene su proyecto ejecutivo datado de 2005 y fue inaugurado

en septiembre de 2009. La biblioteca consiste en un edificio de forma rectangular de aproximadamente 26 x 33m con tres plantas: planta sótano, planta baja y planta primera. Todos los planos principales del proyecto pueden ser encontrados en el Anexo II.

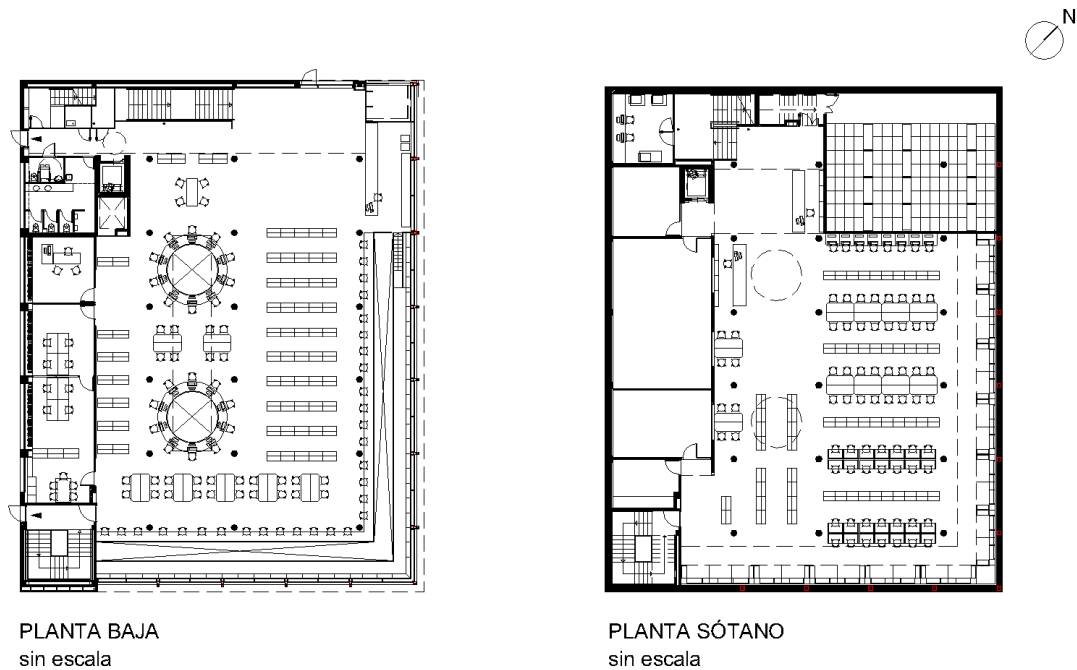


Figura 3.2: Planta Baja y Planta Sótano.

Fuente: Universitat Politècnica de Catalunya.

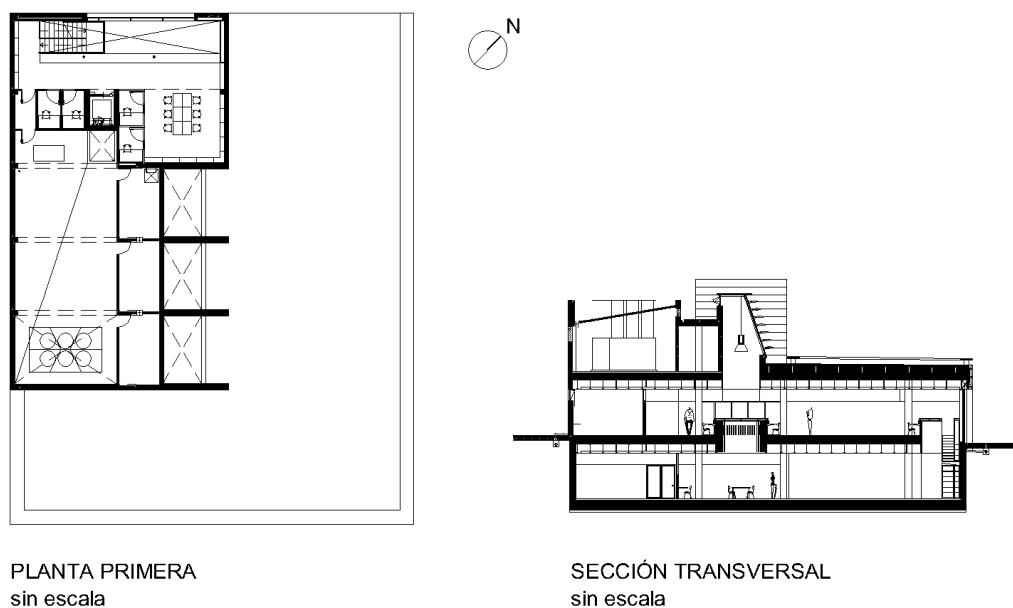


Figura 3.3: Planta primera y sección transversal.

Fuente: Universitat Politècnica de Catalunya.

Interiormente, posee grandes espacios de lectura con acceso libre del público en la planta baja y en la planta sótano. Estas plantas son conectadas por huecos en la losa donde permite que el aire interno circule y el pasaje de la luz natural, que entra por las grandes fachadas de vidrio y por aberturas de iluminación cenital en centro del edificio. En la planta baja se encuentra también espacios menores en la fachada oeste destinados a pequeñas oficinas administrativas y lavabos, y es donde están también las escaleras.



Figura 3.4: Espacio de lectura en la planta baja y aberturas para iluminación cenital.

Fuente: El autor.

En el sótano, además del espacio de lectura, se tiene 2 almacenes y una sala de fotocopias. En cuanto en la planta primera se tiene un pequeño espacio para lectura y otras tres pequeñas salas de estudio individual, además de la sala de maquinas con los equipos de climatización. En esta última planta se sitúa también una grande terraza con acceso hecho externamente por una pasarela que liga al edificio de la Escuela de Arquitectura.



Figura 3.5: Planta sótano y pasarela de acceso en la fachada Norte.

Fuente: El autor.

Es posible observar que el edificio fue proyectado para ser climatizado durante todo su funcionamiento, que el usual en edificios de bibliotecas, pues con excepción de los espacios de oficinas y lavabos, las aberturas operables son pocas y de pequeñas, en particular para el grande espacio de lectura. En la planta baja, en este espacio existen cuatro ventanas operables iguales a de la Figura 3.6, siendo dos en la fachada Sur y dos en la fachada Este. En la planta primera existe apenas una ventana operable que puede ser vista también en la Figura 3.6. Sin embargo, las aberturas operables que hay en la entrada de luz cenital en la planta primera pueden permitir un flujo interno del aire por efecto chimenea.



Figura 3.6: Aberturas operables en la planta baja y en la planta primera.

Fuente: El autor.

En el proyecto original de la Biblioteca previa protecciones solar en todos los cerramientos de vidrios de las fachadas Sur y Este del espacio de lectura en la planta baja, que al final no se hicieron. Según los planos consultados, inicialmente eran perfiles horizontales tipo venecianas de aluminio. En otros planos más recientes revisados, se puede ver protecciones tipo lamas en las fachadas, como muestra la Figura 3.7.

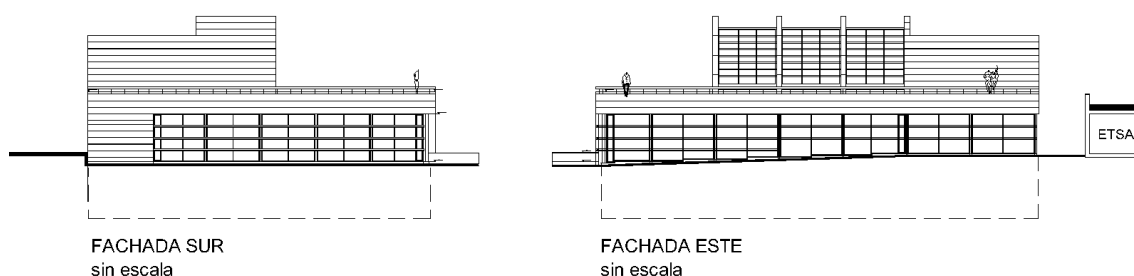


Figura 3.7: Fachadas Sur y Este con las lamas del proyecto original.

Fuente: Universitat Politècnica de Catalunya.

3.1.2. Ubicación y Región Climática

La Biblioteca se sitúa a una latitud de N 41° 23' 2.1444" y longitud de E 2° 6' 48.0505", y está ubicada en el Campus Sur de la UPC en la ciudad de Barcelona - España, entre los edificios de la Escuela de Edificación (EPSEB) y la Escuela de Arquitectura (ETSAB). El acceso principal está situado en la fachada Norte de su planta baja y puede realizarse por una pasarela cubierta que liga al edificio de la ETSAB. Este acceso está en un nivel -4m en relación a la Av. Diagonal. En la fachada Sur el solar tiene un acceso en el mismo nivel de la Calle de Pau Gargalló.



Figura 3.8: Ubicación entre los edificios de la EPSEB y de la ETSAB.

Fuente: Internet.

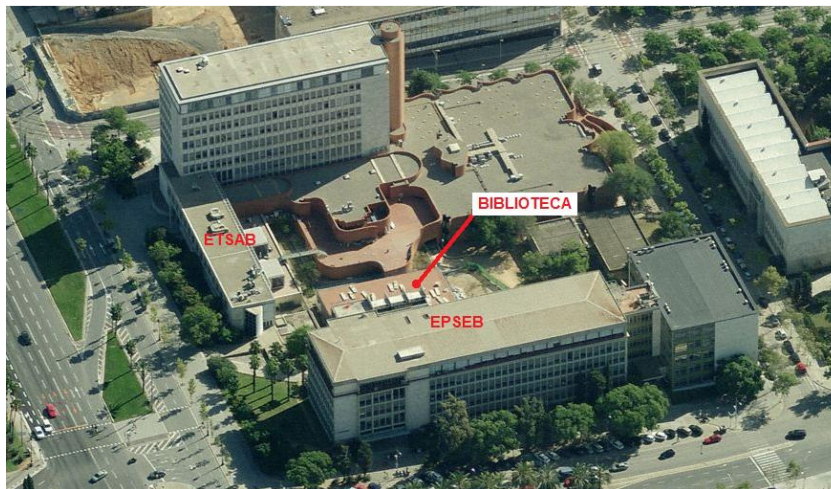


Figura 3.9: Vista aérea ubicación entre los edificios de la EPSEB y de la ETSAB.

Fuente: Internet.

Los vientos predominantes en Barcelona provienen del Norte durante la mayor parte del año. Sin embargo, en la primavera y el verano el régimen de brisas del Mediterráneo provoca una mayor interacción entre la brisa de la tierra y de la procedente del mar. Con esto, durante gran parte del verano los vientos provienen más del Sur [67]. Entonces, en este periodo las fachadas Sur y Oeste del edificio suelen estar a barlovento, y las fachadas Este y Norte a sotavento.

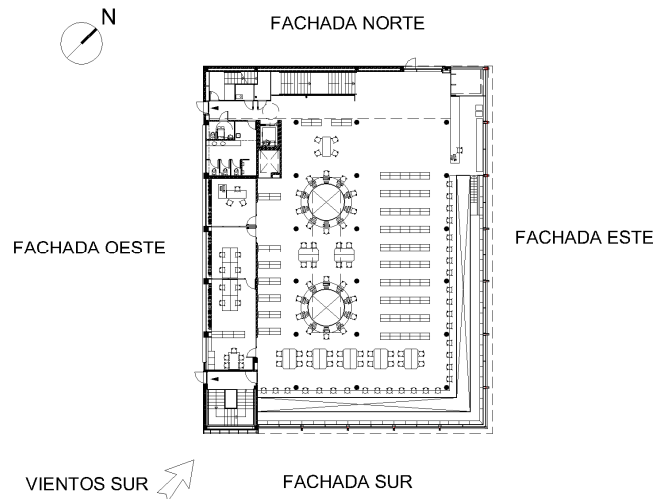


Figura 3.10: Orientación de las fachadas y vientos Sur.

Fuente: El autor.

La ciudad de Barcelona tiene un clima mediterráneo de tipo Litoral Central. Los inviernos son suaves con medias de 9°C a 11°C y los veranos son calurosos con medias entre 23°C y 24°C. Posee una amplitud térmica anual moderada y una amplitud térmica diaria media de 9°C aproximadamente en los meses de verano. La precipitación anual media es alrededor de 600mm, siendo la estación más lluviosa otoño, seguida de la primavera, y la seca el verano, sobre todo el julio [68].

3.1.3. Materiales Constructivos

El edificio tiene su estructura de pilares y losas hechas de hormigón. Según la memoria descriptiva del proyecto, los cerramientos de las fachadas son de ladrillo cerámico de 29x14x10cm con aislamiento térmico de Poliuretano. Proyectado con una espesura mínima de 3cm sobre el exterior de la pared y el acabado externo de fachada ventilada de piedra natural de 4cm de espesor suportada por una subestructura metálica de aluminio. Las carpinterías exteriores, puertas y ventanas son metálicas de aluminio anodizado. Todos los vidrios son tipo "Climalit" de 3+3/6/4+4mm.

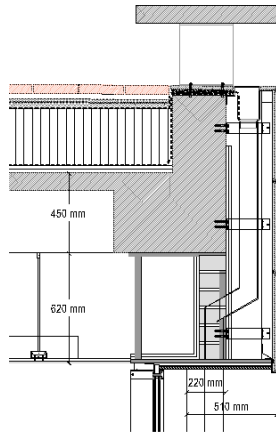


Figura 3.11: Detalle constructivo.

Fuente: Universitat Politècnica de Catalunya.



Figura 3.12: Fachada Este.

Fuente: El autor.

La cubierta es transitable invertida con una lamina impermeable de EPDM doble con una aislamiento térmico tipo “Styrodur” de 40mm de espesura. Las pendientes están hechas de hormigón celular sin granulado de densidad 300kg/m^2 de 12.5cm de espesor medio. Se utilizó una base de mortero para recibir y fijar el pavimento de adoquines de Klinker de la casa Mapesa de $200 \times 100 \times 50\text{mm}$.

3.2. ELABORACIÓN DEL MODELO COMPUTACIONAL

La elaboración del modelo tridimensional de la Biblioteca ETSAB en el programa DesignBuilder se basó en los archivos CAD del proyecto actualizado. Se buscó al máximo introducir todos los datos iguales o similares a los reales descritos en el apartado anterior sobre el objeto de estudio.

El primer paso al utilizar el programa es escoger la localidad del edificio que se irá modelar. Los datos meteorológicos de más de 2.100 localidades ya están disponibles en el formato de datos climáticos horarios del EnergyPlus. El DesignBuilder emplea este formato de datos para definir las condiciones externas durante las simulaciones. Cada lugar tiene un archivo propio que contiene datos como la temperatura de bulbo seco, la radiación solar y las condiciones atmosféricas, entre otros, para cada hora de un año completo [69].

Estos paquetes de datos climáticos generalmente se derivan de registros horarios llevados a cabo en el lugar por oficinas meteorológicas y/o de servicios climáticos nacionales [69]. En nuestro caso, fue escogido el archivo con el paquete datos de la ciudad de Barcelona

(ESP_BARCELONA_IWEC). Se puede escoger también la orientación exacta del edificio, que para el eje longitudinal del edificio es de 315° en relación al Norte.

Los siguientes pasos fueron la modelación del envoltorio en 3 dimensiones de la Biblioteca según el proyecto, así como su compartimentación interna en todos los niveles. Se introdujeron las divisiones internas, los huecos en lasas, las puertas y ventanas del edificio, así como los detalles externos. No es posible modelar escaleras en el programa, por eso se hicieron solamente los huecos en las lasas en las posiciones exactas para permitir la circulación del aire internamente.

Con esto, los pequeños espacios existentes por debajo de las escaleras tampoco pudieron introducirse en el programa. Además, el propio manual del programa aconseja que se intente simplificar al máximo el modelo para que los cálculos no se demoren demasiado, especialmente la simulación CFD. En particular, en los espacios de mismo uso, se aconseja que no se hagan compartimentaciones internas pues no son significativas para las simulaciones energéticas. Por eso, en este modelo las oficinas y almacenes son representados sin sus divisiones internas.

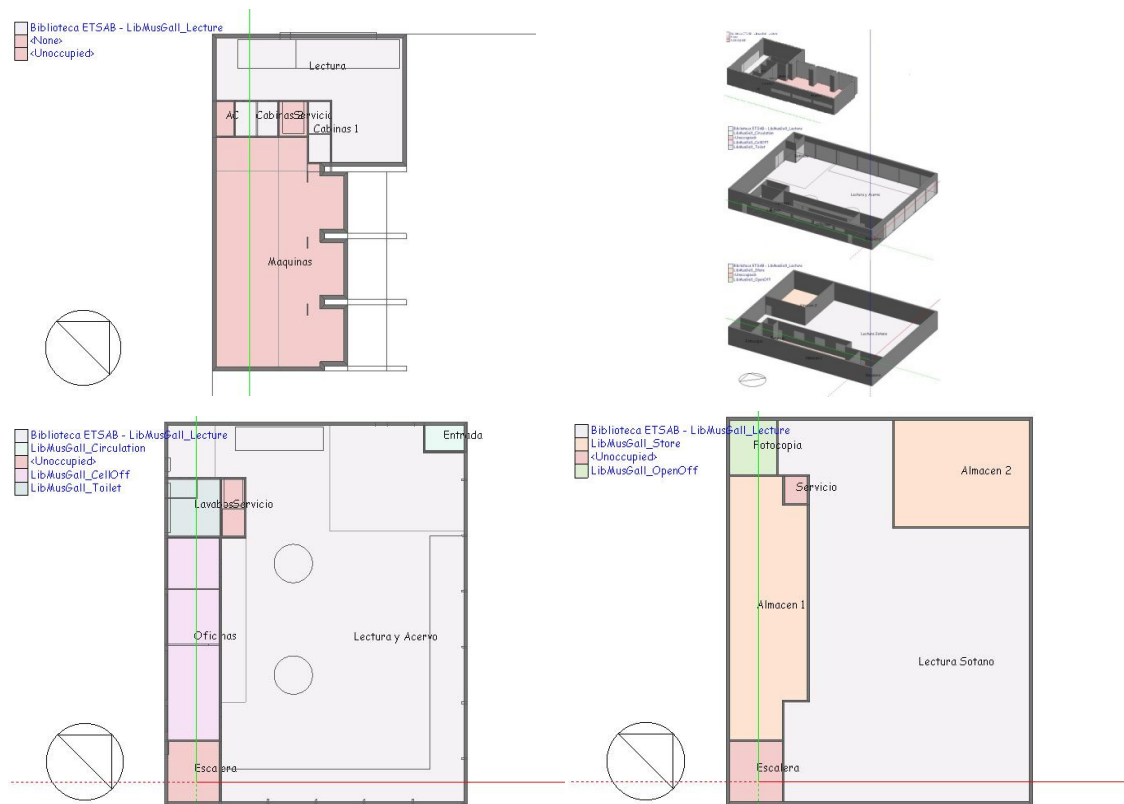


Figura 3.13: Elaboración del modelo computacional.

Fuente: El autor.

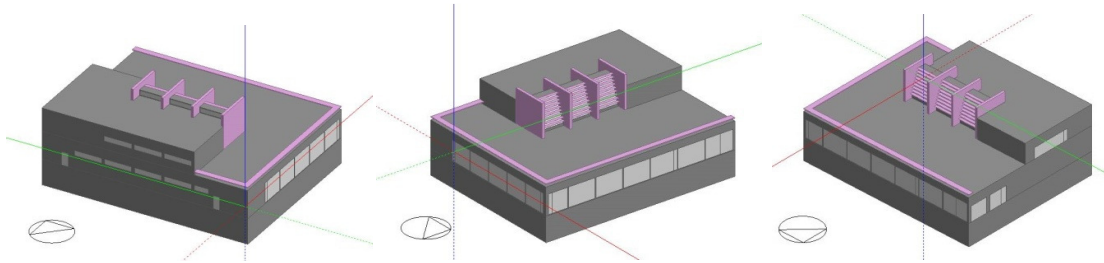


Figura 3.14: Modelo computacional en diferentes vistas.

Fuente: El autor.

No obstante, mismo que cargando más el modelo, si recreó también tridimensionalmente el entorno cercano al edificio. Pues de este modo, el programa puede calcular todas las sombras que los edificios vecinos proyectan sobre él durante toda la trayectoria solar y esto influye directamente en los resultados de los cálculos energéticos.

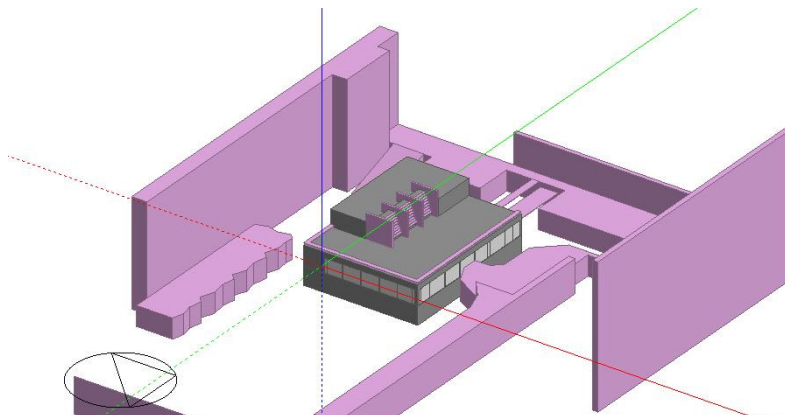


Figura 3.15: Modelo computacional con el entorno.

Fuente: El autor.

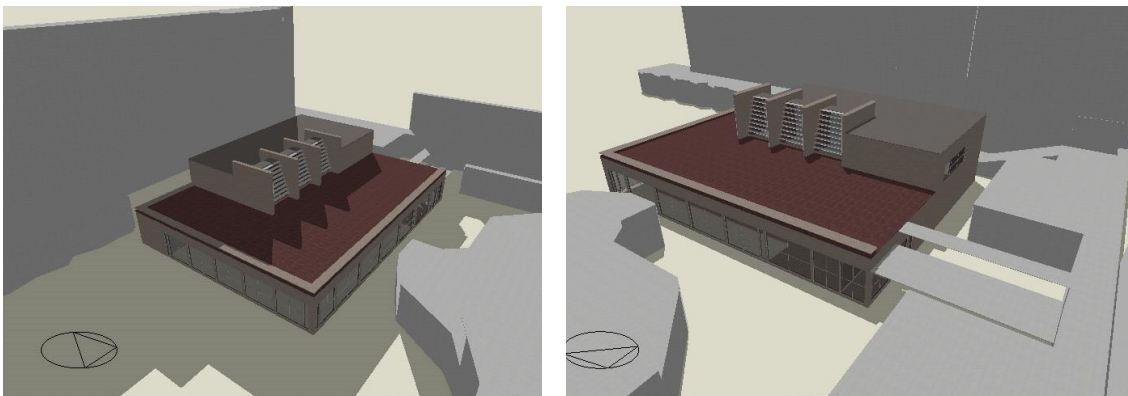


Figura 3.16: Imágenes renderizadas del modelo con el entorno.

Fuente: El autor.

Para configurar los parámetros del modelo, el programa posee plantillas de base de datos donde se tiene información típica sobre diversos aspectos del edificio de acuerdo con su actividad principal. Se puede crear nuevas plantillas o adaptar alguna a las especificidades del proyecto. Para esta Biblioteca se creó una plantilla basada en las configuraciones típicas existentes en el programa para bibliotecas, museos y galerías. Cada espacio interno fue configurado también según su uso independiente del uso general del edificio. Los principales parámetros ajustados son detallados a continuación.

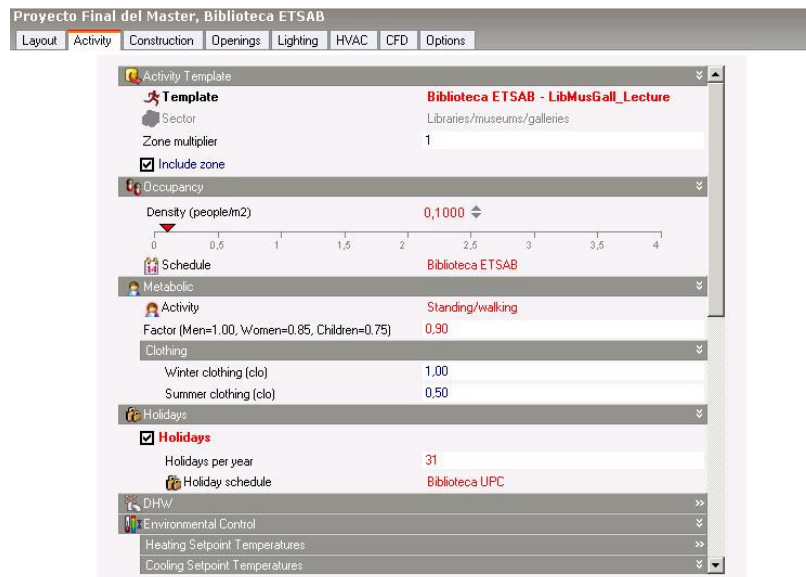


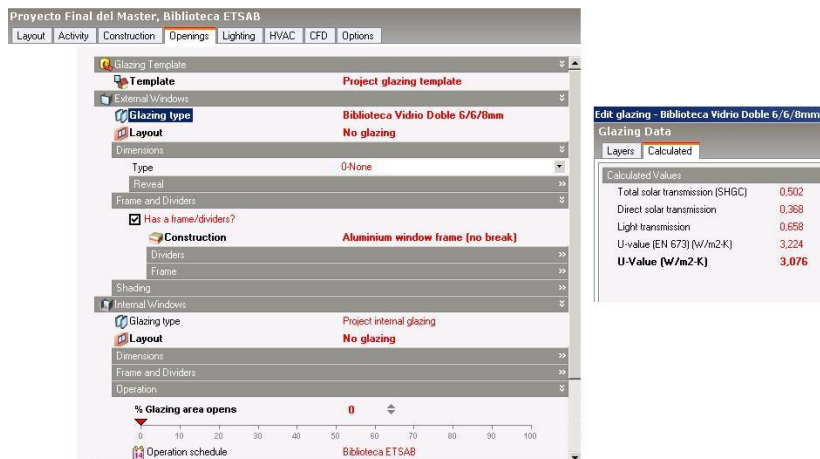
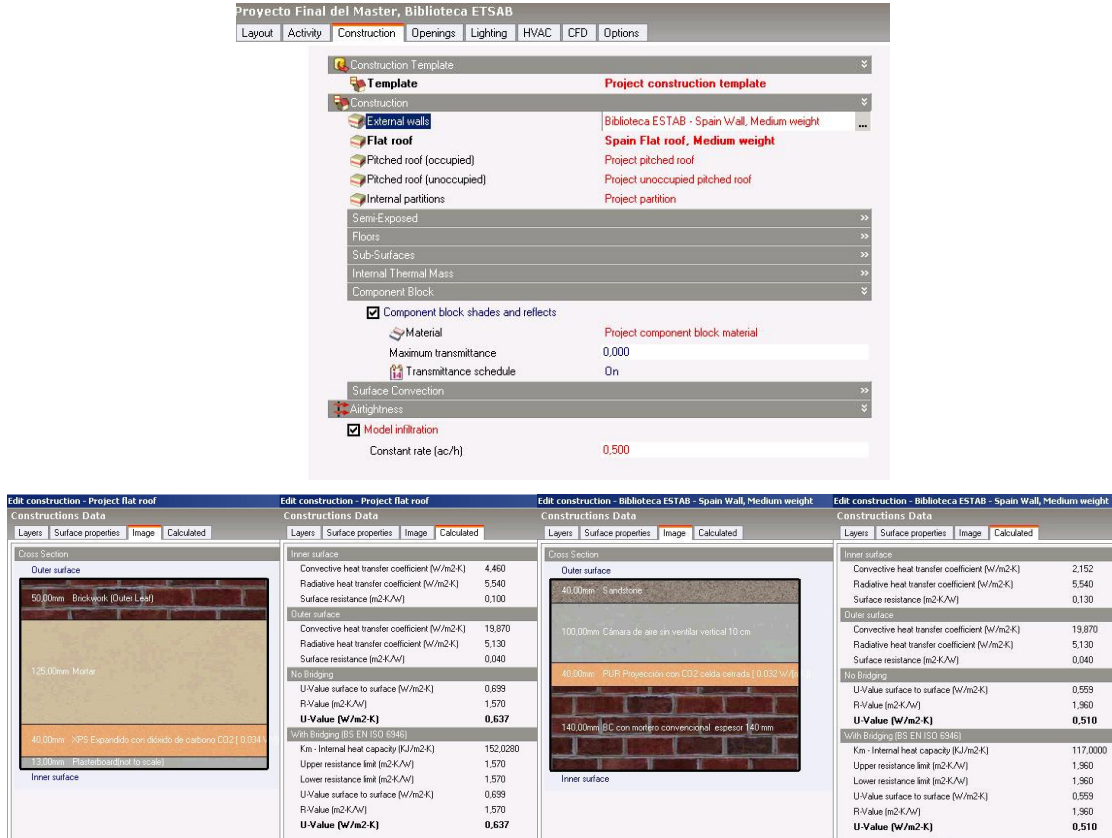
Figura 3.17: Configuración de las actividades en el DesignBuilder.

Fuente: El autor.

La ocupación máxima del edificio basada en el número de asientos internos disponibles es entorno de 0.15 personas/m². Sin embargo, se observó que en el verano la ocupación de la biblioteca se reduce sensiblemente. Por eso, se adoptó para estas simulaciones una ocupación media de 0.10 personas/m². La tasa metabólica fue dejada la configuración estándar para actividades internas en bibliotecas que es de 0,9 Met (1 Met= 58 W/m²) y corresponde a actividades sentadas y ligeras.

Para la vestimenta, se utilizó el estándar de 0,5 Clo para el verano. Se consideró el mes de agosto como un todo sin funcionamiento, pues es cuando la Biblioteca ETSAB se cierra para las vacaciones. Se consideró las ganancias de 1 W/m² con fracción radiante de 0,2 de los ordenadores y también el mismo valor para los otros equipamientos de oficinas durante el horario de funcionamiento de la biblioteca (9h a las 21h). La iluminación general configurada fue de 300 lux.

Se crearon configuraciones personalizadas para los principales elementos constructivos. Los cerramientos utilizados siguen el proyecto y obtuvieron una transmitancia térmica (U) de $0,51 \text{ W/m}^2\text{K}$. La cubierta plana transitable obtuvo una $U=0,637 \text{ W/m}^2\text{K}$ y los doubles vidrios una $U = 3,076 \text{ W/m}^2\text{K}$, como muestran las imágenes a continuación.



4. MEDICIONES IN SITU

La segunda parte de este trabajo constó de mediciones hechas dentro y fuera del edificio objeto de estudio que son descritas a continuación. Las mediciones internas del edificio se concentraron en el espacio de lectura de acceso libre en la planta baja y en la planta sótano, pues estos espacios ocupan la mayor parte del área interna del edificio y son donde se concentran la mayor parte de los usuarios de la biblioteca.

4.1. MEDICIONES DE TEMPERATURA Y HUMEDAD RELATIVA DEL AIRE

Para las mediciones internas de Temperatura y Humedad Relativa del aire se utilizaron dos equipos del tipo Testo 175-H2 que tienen 2 canales con sensores internos que miden simultáneamente temperatura y humedad. El modelo posee una batería de larga duración y permite programar el inicio, fin e intervalos de las mediciones.



Figura 4.1: Equipo Testo 175-H2.

Fuente: Universitat Politècnica de Catalunya.

Un aparato se colocó en la planta baja y otro en la planta sótano para medir cada 10 min continuamente, temperaturas y humedades relativas del aire interior de la Biblioteca tanto en el horario de funcionamiento del edificio como por la noche. El periodo de las mediciones se inició el día 28 de mayo y finalizó día 21 de julio, con solo 4 interrupciones puntuales hechas para poder salvar los datos en el ordenador y/o cambiar de posición los aparatos para así tener una visión general de las temperaturas y humedades en el edificio. Las posiciones exactas y días de las mediciones se indican en la Figura 4.2.

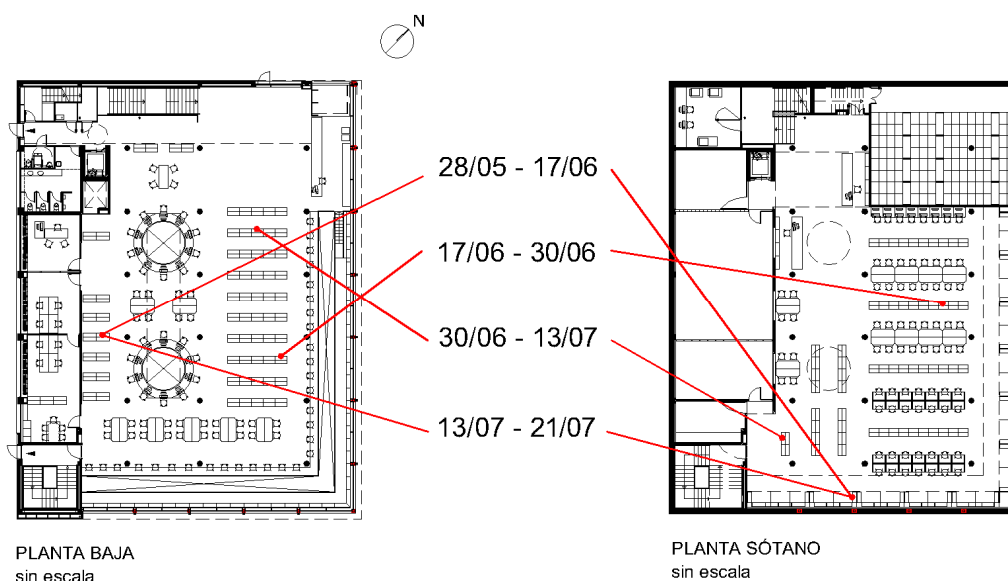


Figura 4.2: Posiciones y fechas de las mediciones de temperatura y humedad.

Fuente: El autor.

Analizando todos los resultados (ver Anexo III), es posible ver que durante la mayor parte de este periodo de mediciones las temperaturas medias fueron entre 23 a 26°C durante el tiempo de funcionamiento de la Biblioteca. Estos valores pueden considerarse adecuados en el verano según el modelo de Fanger, que es válido para edificios climatizados y actividades sedentarias. La humedad relativa del aire interior permanece siempre en el rango de 30 a 70% que también se considera satisfactorio.

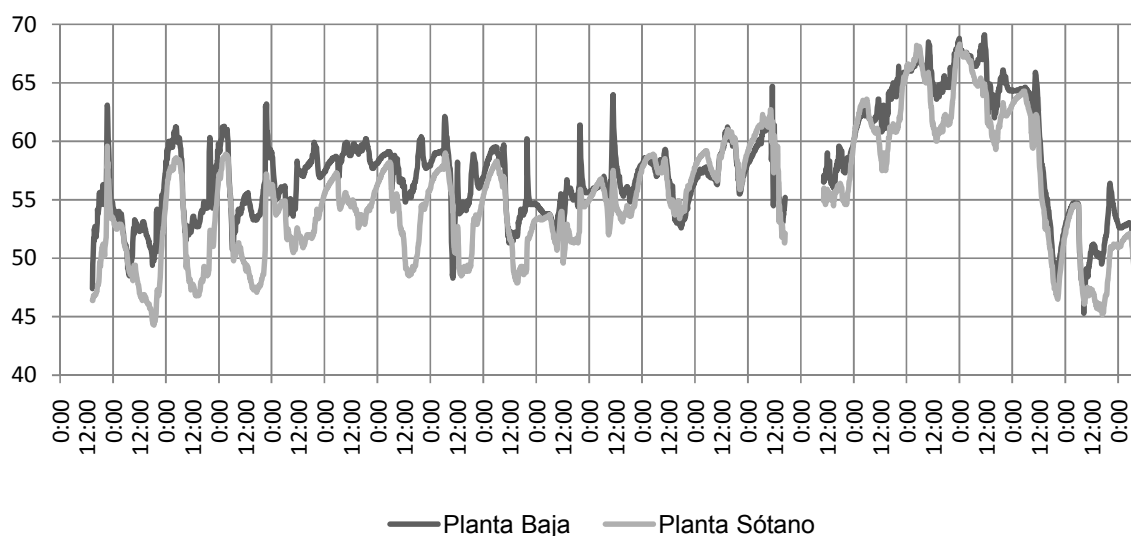


Figura 4.3: Humedades relativas del aire interior entre los días 28/05 y 17/06.

Fuente: El autor.

Sin embargo, se puede observar en la Figura 4.4 que entre los días 7 y 9 de junio las temperaturas interiores llegaron a los 28 o 29°C durante el periodo de funcionamiento de la Biblioteca. Estos valores están significativamente por encima de la temperatura externa máxima registrada de 26,7°C entre estos mismos días en la estación meteorológica de la Facultad de Física (la más cerca del objeto de estudio).

Estas temperaturas interiores fueron registradas también en los días 4, 5 y 7 de julio. Estos valores son considerados, según los padrones internacionales de confort, bien elevados para edificios climatizados. Esto puede ser explicado por algún fallo mecánico del sistema. En cambio, se puede observar también en la Figura 4.4 que entre los días 12 y 14 de junio las temperaturas estaban en media entre 20 y 21°C, considerado frío para los niveles de confort adecuados en el verano. Esto debe ter ocurrido debido a una mala configuración del sistema.

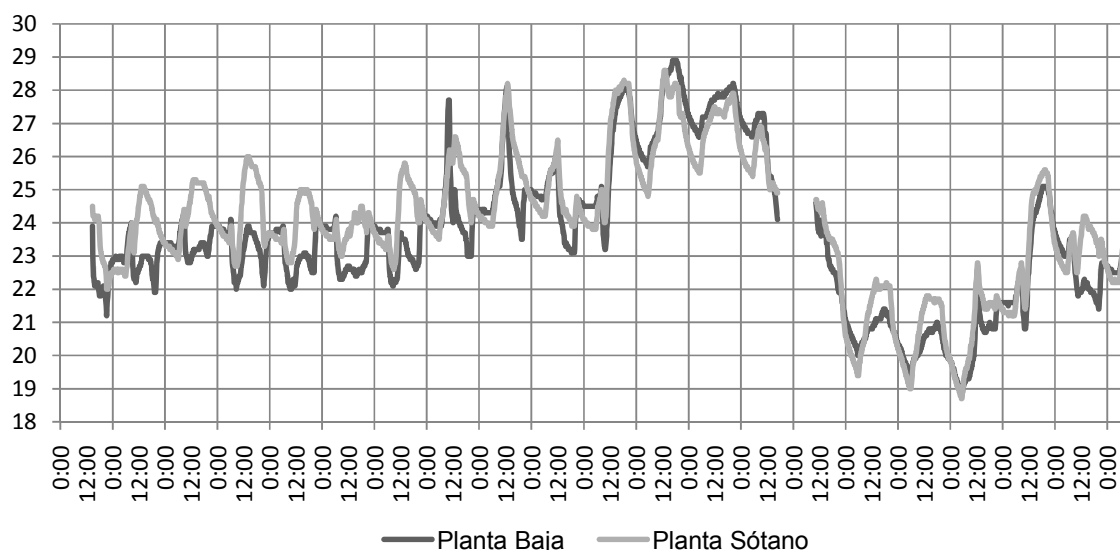


Figura 4.4: Temperatura interiores entre los días 28/05 y 17/06.

Fuente: El autor.

4.2. MEDICIONES DE CO₂

Para medir las cantidades de CO₂ en el aire interior del edificio se utilizó un aparato del tipo Testo 635-2 mostrado en la Figura 4.5. Este equipo permite medir diversos parámetros físicos dependiendo de su programación y de la sonda añadida a él. En este caso utilizamos la sonda específica para medición de CO₂.



Figura 4.5: Equipo Testo 635-2.

Fuente: Universitat Politècnica de Catalunya.

Se consideraron 13 puntos diferentes de la Biblioteca, siendo 6 puntos en la planta sótano y 7 en la planta baja. Se realizaron los registros el día 11/06/2010, entre las 10:30h y las 12h aproximadamente. El aparato midió cada 10 segundos durante intervalos aproximados de 5 min en cada punto escogido. Las localizaciones de las mediciones pueden se indican los planos de la Figura 4.6.

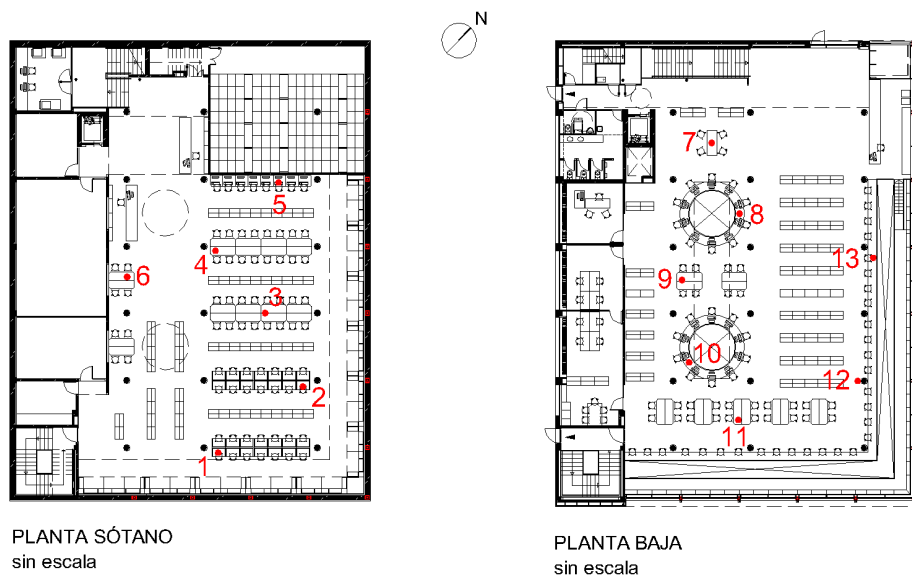


Figura 4.6: Orden y localización de las mediciones de CO₂.

Fuente: El autor.

Se puede observar que los niveles de CO₂ durante este periodo estaban entre 480 a 620 ppm (parte por millón) que equivalen a concentración de 0,048% y 0,062% respectivamente. Estos valores están dentro de la concentración óptima para ambientes interiores (0,07%). Se percibe valores levemente mayores en la planta baja en comparación con la planta sótano. Esto puede ser explicado debido a un número mayor de personas en la planta baja en el momento de las mediciones. En los gráficos inferiores (Figuras 4.7 y 4.8) se pueden ver los resultados de todas las mediciones.

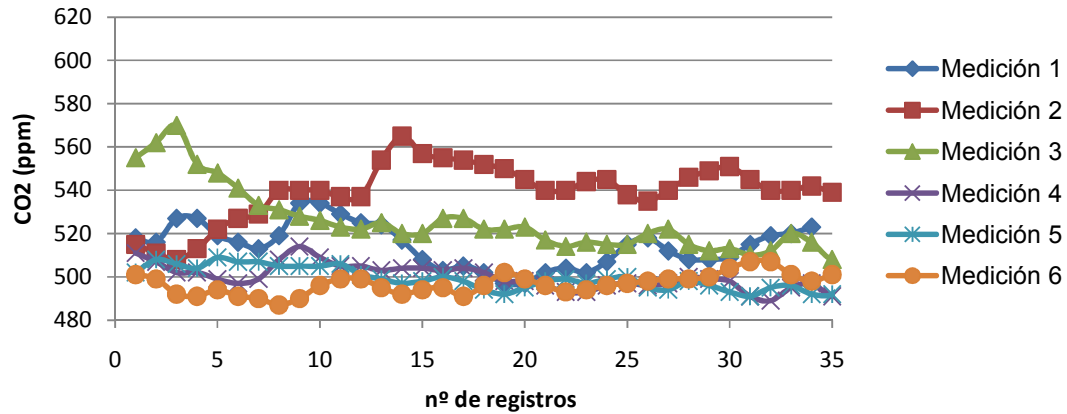


Figura 4.7: Niveles de CO₂ medidos en la planta sótano.

Fuente: El autor.

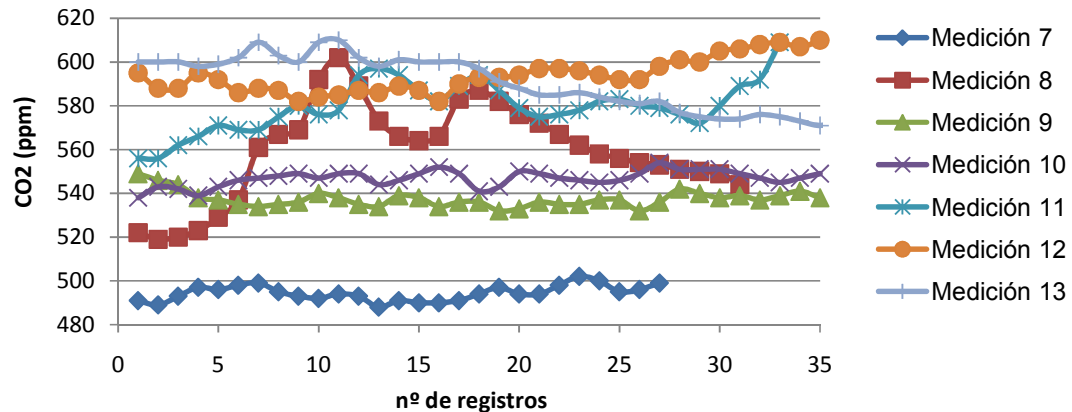


Figura 4.8: Niveles de CO₂ medidos en la planta baja.

Fuente: El autor.

4.3. MEDICIONES DE VELOCIDAD DEL AIRE INTERIOR Y EXTERIOR

El mismo aparato Testo 635-2 fue utilizado para hacer las mediciones de velocidades del aire utilizando la sonda Anemómetro. Se realizaron 12 mediciones puntuales en el interior del edificio, 6 en la planta sótano y 6 en la planta baja, y 10 mediciones puntuales externas en el entorno del edificio en el día 17/06/2010 de las 12:30h hasta las 14:30h aproximadamente. El aparato midió cada 10 segundos durante intervalos aproximados de 5 min en cada punto interior y 1 min en cada punto exterior del edificio para así tener una visión general de estas velocidades. Las localizaciones de cada medición pueden ser vistas en la Figura 4.9 y todos los resultados de estas mediciones pueden ser vistos en las Figuras 4.10, 4.11 y 4.12.

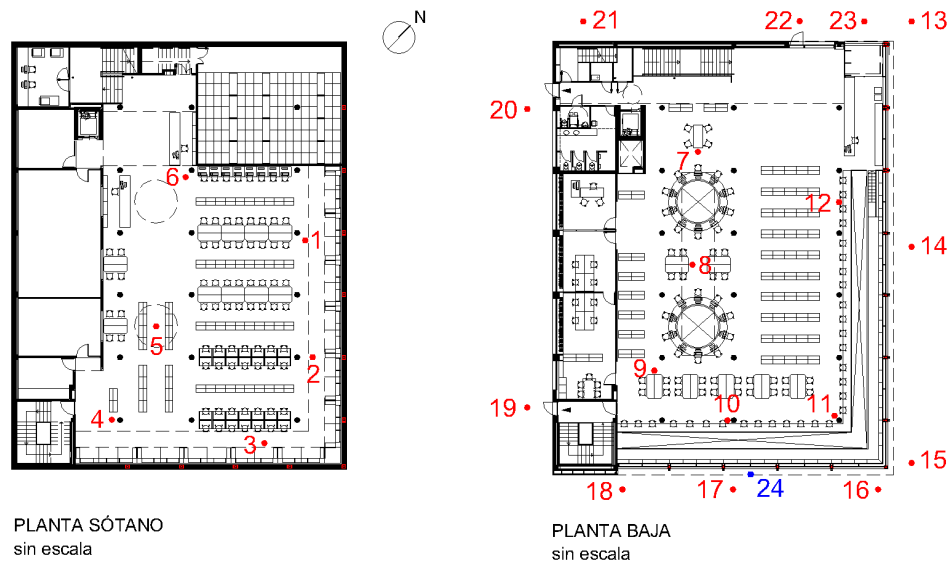


Figura 4.9: Orden y localización de las mediciones de velocidad del aire interior y exterior

Fuente: El autor.

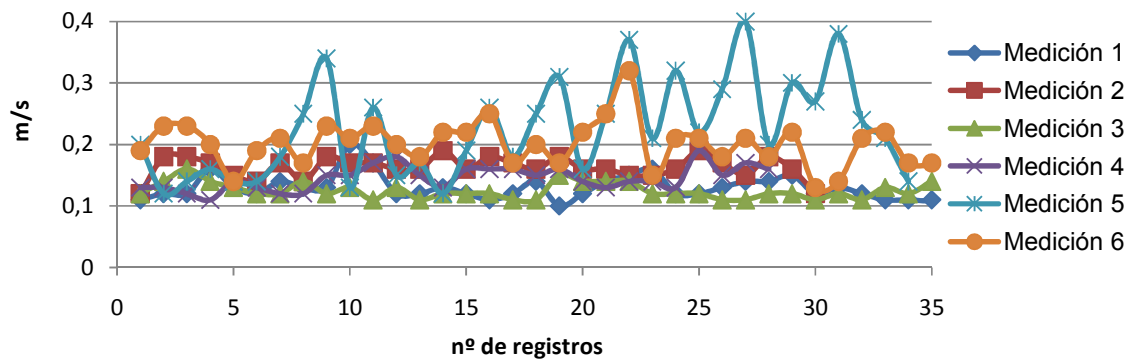


Figura 4.10: Velocidades del aire interior de la planta sótano.

Fuente: El autor.

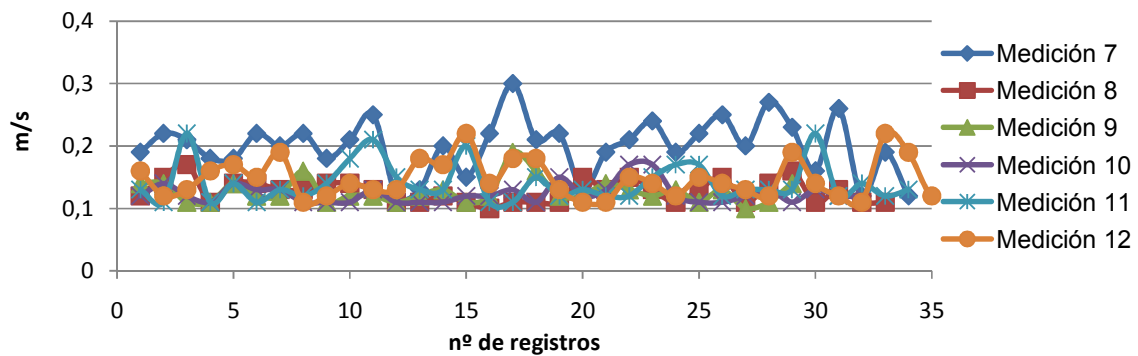


Figura 4.11: Velocidades del aire interior de la planta baja.

Fuente: El autor.

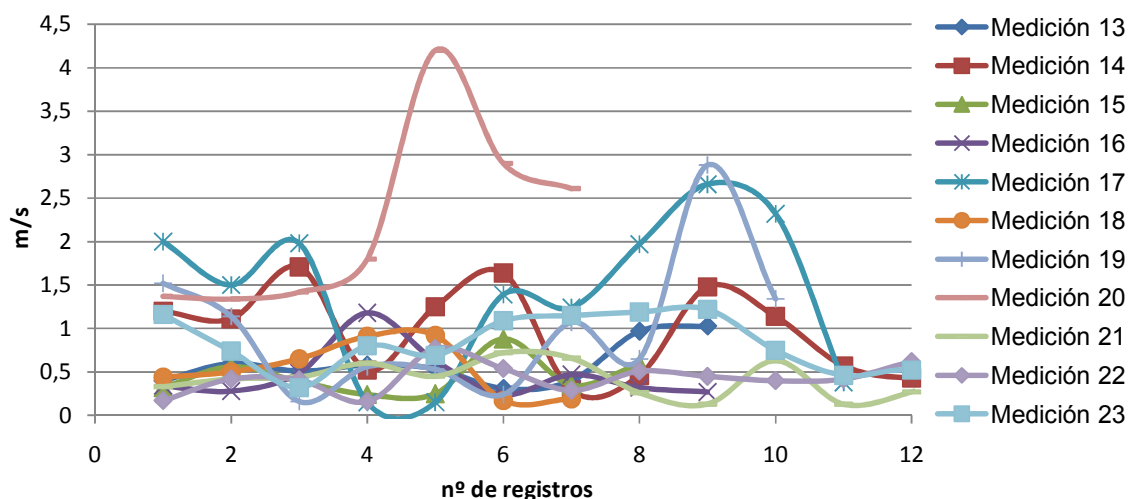


Figura 4.12: Velocidades del aire exterior en el entorno cercano al edificio.

Fuente: El autor.

En el día 21/07/2010 se hizo otra medición puntual de velocidad del aire exterior de las 19:20 hasta las 19:50h en la fachada Sur del edificio como se indicó también en el plano de la Figura 4.9 (medición 24 en azul). El aparato medió a cada 10 segundos durante este intervalo de 30min. En el gráfico de la Figura 4.13 se puede observar el resultado.

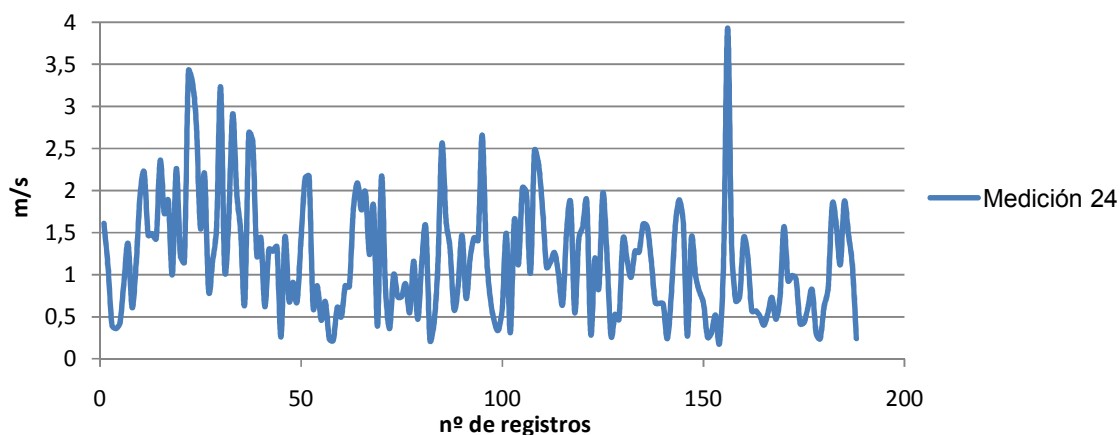


Figura 4.13: Velocidades del exterior en la fachada Sur del edificio.

Fuente: El autor.

En los gráficos de las velocidades del aire interior (Figuras 4.10 y 4.11) se observa que los valores son bajos, nunca llegando a 0,5m/s. Estos valores están dentro del esperado en un edificio climatizado. Analizando las velocidades del aire exterior en las Figuras 4.12 y 4.13, se observa una variabilidad importante de los datos con velocidades de 0 a poco más de

4m/s, valores dentro del normal en centros urbanos. Esta variabilidad demuestra la inconstancia y la complejidad del comportamiento de los vientos influenciados por las características del entorno.

En la estación meteorológica de la Facultad de Física en el momento de la medición 24 (Figura 4.13), se registró una velocidad media del aire de 2,7m/s, con máxima de 4,7 m/s. Son valores mayores que los medidos in situ, puesto que la estación hace las mediciones a una altura de 10m. Esta es mayor que la altura a la que se realizaron las medidas de nuestro estudio, aproximadamente a 1,5m de altura. Cuanto mayor es la altura, más veloces suelen ser los vientos.

4.4. MEDICIONES DE FLUJOS EN CERRAMIENTOS

Los flujos de los cerramientos fueron medidos a través de dos Fluxómetros del modelo LI-19, mostrado en la Figura 4.14. Este aparato hace una lectura por sensores y puede ser utilizado para sensores con una señal de salida muy baja. El intervalo de almacenamiento y el tiempo de inicio de la medición pueden ser programados.

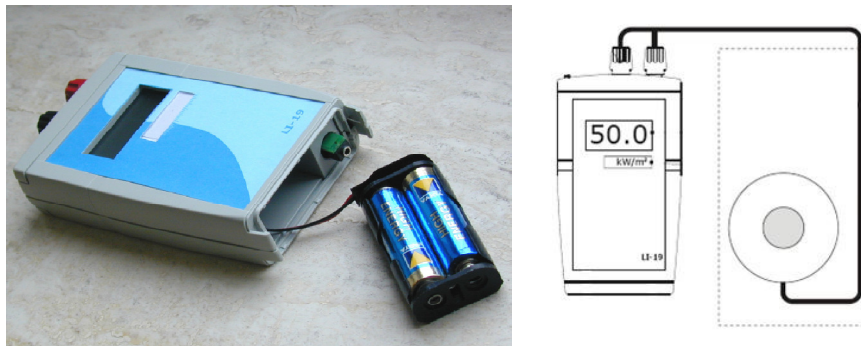


Figura 4.14: Fluxómetro modelo LI-19.

Fuente: Universitat Politècnica de Catalunya.

Las mediciones se hicieron entre los días 21/07/2010 y 28/07/2010 en diversos puntos de los cerramientos externos del espacio de lectura de la planta baja del edificio. Este espacio tiene casi todos sus cerramientos externos hechos con vidrio, con excepción de la fachada Norte. Todos los resultados de las mediciones de flujos en cerramientos pueden ser vistos en el Anexo IV. En la Figura 4.15 se muestra las localizaciones de todas las mediciones, y en las Figuras 4.16 y 4.17 a continuación se puede comparar las mediciones en los cerramientos de las tres fachadas (Norte, Este y Sur) de este espacio.

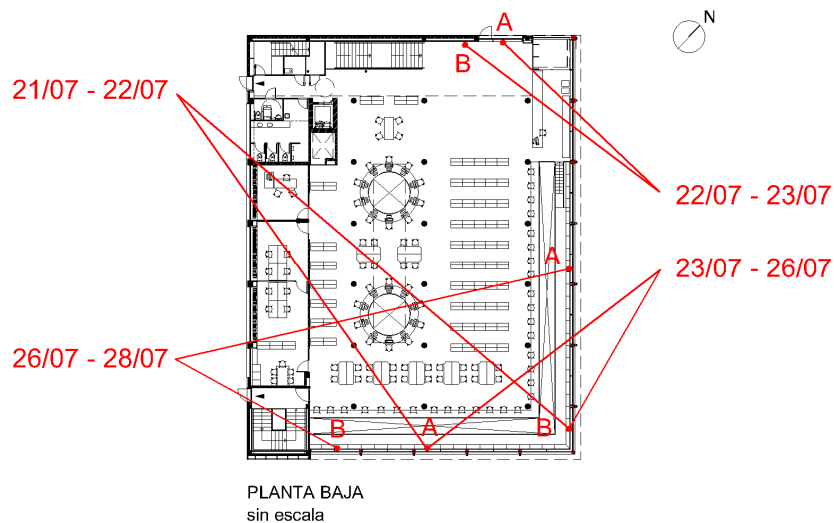


Figura 4.15: Localizaciones y periodos de las mediciones de flujos en los cerramientos.

Fuente: El autor.

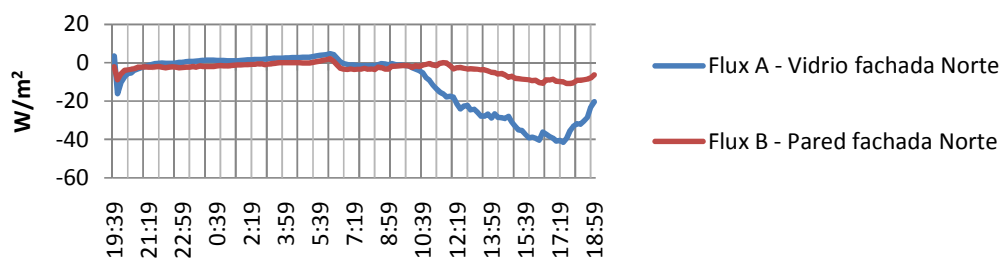


Figura 4.16: Flujos vidrio y pared fachada Norte (Medición 22/07 - 23/07).

Fuente: El autor.

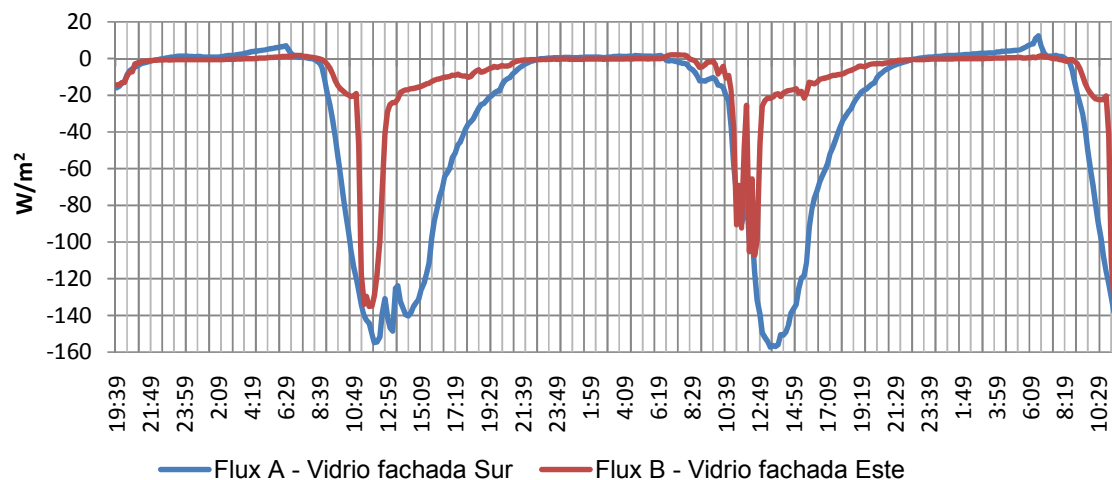


Figura 4.17: Flujos vidrios fachadas Sur y Este (Medición 23/07 - 26/07).

Fuente: El autor.

Analizando los datos se observa una diferencia entre los flujos en cada fachada resultado de la incidencia solar, o no, directamente sobre las mismas, en horarios y periodos diferentes también. Los cerramientos de la fachada Norte (Figura 4.16) son los que muestran los menores valores de flujos de calor incidentes en el edificio durante el día. Esto se debe al hecho de recibir poca incidencia solar directa en el verano debido el trayecto solar y la proximidad a edificios vecinos. Si puede observar también que el cerramiento de vidrio permite pasar más flujos de calor hacia dentro del edificio que la pared, tiendo un pico de flujo de 40 W/m^2 contra 10 W/m^2 del muro

Las fachadas Sur y Este (Figura 4.17) tienen sus cerramiento solo de vidrios y presentan valores mayores y con patrones más similares de flujos de calor entre ellas. Esto ocurrió porque ambas reciben directamente los rayos del sol. La fachada Este está un poco más protegida por la proximidad del edificio vecino, restringido así el tiempo de incidencia solar más allá del trayecto de sol en el verano. En los puntos medidos este tiempo fue de 2h aproximadamente y el pico registrado fue de 130 W/m^2 cerca de las 11h. No obstante, la fachada Sur prácticamente no tiene protección solar por proximidad de edificios vecinos, pues en frente hay un grande jardín. Esta fachada recibe entonces casi toda la incidencia los rayos solares directos durante la trayectoria del sol. Los flujos de calor medidos llegaron a los mayores picos registrados estos días, aproximadamente 160 W/m^2 por la tarde.

4.5. ANÁLISIS GENERAL DE LOS RESULTADOS

A través del análisis de estas mediciones hechas en el edificio objeto de estudio, es posible concluir que en los días que el sistema de climatización estaba funcionando correctamente, los niveles de temperatura, humedad, concentración de CO_2 y velocidad del aire interior eran en general adecuados bajo el punto de vista del confort de los usuarios. Esto es lo esperado para un edificio con sistema de aire acondicionado. Sin embargo, el sistema presentó algunos problemas de funcionamiento durante varios días seguidos o puntuales en este periodo que fue monitoreado. Por eso, no fue suficiente para cumplir su principal función de proporcionar confort a los ocupantes del edificio en estos días de probable fallo mecánico.

En relación a los vientos, mismo con la reducción de las velocidades en el medio urbano, se registraron en situ buenas velocidades y variabilidades de direcciones, con el predominio de los vientos Sur. Fue posible percibir que la falta de protección solar permite una incidencia mucho mayor de la radiación solar en las fachadas Sur y Este. Este calor resulta después en más gastos de energía para ser retirado del espacio de lectura pelo sistema de climatización en el periodo del verano.

5. SIMULACIONES COMPUTACIONALES

5.1. METODOLOGÍA

Para las simulaciones computacionales desarrolladas fue adoptada la siguiente metodología:

- 1) Simulación de referencia utilizando el edificio como está actualmente funcionando con sistema de climatización activado. Esto sirve para tener un valor de consumo base en el verano para comparación con los otros resultados.
- 2) Simulaciones con las diferentes situaciones y estrategias de ventilación natural descritas a continuación para elegir la mejor opción para el edificio estudiado.
- 3) Con la mejor opción elegida, un análisis más profundizado y completo de su funcionamiento utilizando la herramienta CFD.
- 4) Por último, también con la mejor opción elegida, simulaciones en dos ciudades de climas diferentes para comparar el funcionamiento de la ventilación natural bajo condiciones climáticas diferentes. Para estas comparaciones fue escogido el clima tropical del Brasil por ser un país en el otro hemisferio y con una variación climática amplia. Fueron simulados el clima ecuatorial de la ciudad de Belém y el templado de São Paulo durante el verano de estas ciudades.

5.2. LAS SIMULACIONES

La ciudad de Barcelona atiende relativamente bien durante el verano a los criterios climáticos necesarios para la utilización de las dos principales estrategias de ventilación natural para la eficiencia energética estudiadas en esta investigación: Enfriamiento Directo (ventilación de confort) y el Enfriamiento Indirecto (ventilación nocturna). Por eso ambas fueron consideradas para este estudio, aplicándolas en conjunto o en separado.

Las estrategias simuladas en esta investigación fueron:

- Ventilación de Confort: empleada únicamente durante el horario de funcionamiento de la biblioteca de 9h a las 21h.
- Ventilación de Confort + Ventilación Nocturna directa: empleadas en conjunto, o sea, como si las ventanas quedasen constantemente abiertas durante los días de verano.

- Ventilación Nocturna directa + Climatización: durante el día es accionado el sistema de aire acondicionado en el horario de funcionamiento de la biblioteca y por las noches son abiertas las ventanas.

Para esta última estrategia, fue adoptado el horario de 21h a las 9h porque tiene la ventaja de no exigir automatización, pues las ventanas serían abiertas por las personas encargadas en el final del trabajo y cerradas por las mañanas al iniciar el funcionamiento del sistema de climatización, y con esto no tiene más coste de inversión, mantenimiento y energía de un sistema domótico.

Estas situaciones de ventilación nocturna sólo son consideradas posibles en la realidad mediante la utilización de sensores de lluvia para las ventanas de accionamiento automático, o la utilización de ventanas que reduzcan la posibilidad de entrada de la lluvia al edificio, y/o una protección como lamas o toldo para ellas. Es importante también que no tengan aéreas libres suficientes para el paso de una persona. Para esto, se puede utilizar rejillas que permiten el paso del aire y mantienen la seguridad. Un modelo que puede atender a estas necesidades es la ventana del tipo basculante, que se puede ver algunos ejemplos en la Figura 5.1.



Figura 5.1: Ejemplos de ventanas tipo basculante.

Fuente: Internet.

Además de las estrategias descritas, fueron creadas 3 situaciones para estudiar la ventilación natural en el edificio objeto de estudio:

- La primera situación consistió en simular la ventilación natural en el edificio como está construido, utilizando solo las aberturas operables existentes;
- En la segunda situación se hicieron simulaciones con más ventanas operables que las actuales, sustituyendo las carpinterías fijas existentes por otras operables;

- Finalmente, fueron simuladas las aberturas operables creadas en la situación anterior más las lamas que el proyecto original tenía en las fachadas Sur y Este del edificio.

En este trabajo se consideraron solo situaciones que no producen cambios significativos en el proyecto original. Por eso, las alteraciones descritas son apenas en las carpinterías existentes, para así poder investigar las estrategias de ventilación natural en el edificio con el propósito de reducir su consumo de energía.

A continuación se puede ver en la Tabla 5.1 un resumen de todas las simulaciones desarrolladas en este trabajo.

Tabla 5.1: Resumen de las Simulaciones

Simulación	Descripción
Referencia	Edificio actual + Climatización (Simulación de Referencia)
S-1.1	Edificio actual + ventilación de confort
S-1.2	Edificio actual + ventilación de confort y nocturna
S-1.3	Edificio actual + ventilación nocturna y climatización
S-2.1	Edificio con más aberturas + ventilación de confort
S-2.2	Edificio con más aberturas + ventilación de confort y nocturna
S-2.3	Edificio con más aberturas + ventilación nocturna y climatización
S-3.1	Edificio con lamas y más aberturas + ventilación de confort
S-3.2	Edificio con lamas y más aberturas + ventilación de confort y nocturna
S-3.3	Edificio con lamas y más aberturas + ventilación nocturna y climatización
CFD	Dinámica de Fluidos Computacional (con la mejor opción)
S-Bel	Mejor opción + entorno climático de Belém
S-SP	Mejor opción + entorno climático de São Paulo

5.3. PARÁMETROS CONFIGURADOS EN EL DESIGNBUILDER

5.3.1. Sistema de Climatización HVAC

Tanto en la simulación de referencia, como en las simulaciones de ventilación nocturna que trabajan en conjunto con el sistema de climatización, fueron configurados en el DesingBuilder el mismo sistema HVAC (Heating, Ventilation and Air Conditioning) para sí tener el mismo patrón de consumo y poder hacer las comparaciones de funcionamiento de las estrategias.

Se utilizó la opción “HVAC Compacto”, en la cual se modelan de manera detallada en EnergyPlus y permite que se trabaje con la opción de ventilación natural utilizada en este estudio. Se escogió la opción de “Autodimensionado”, en la cual la capacidad de los sistemas se calcula siempre antes de cualquier simulación. En la plantilla HVAC se seleccionó el modelo de Expansión Directa con la ventilación mecánica en el modo cíclico. Se seleccionó también la opción deshumidificar en el control de humedad.

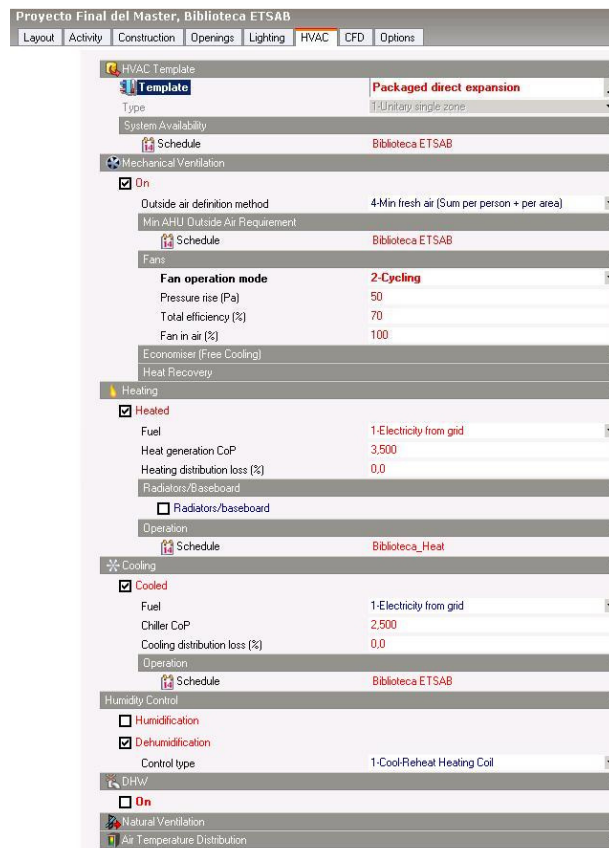


Figura 5.2: Configuración plantilla HVAC.

Fuente: El autor.

En la plantilla de Actividades fueron configurados la temperatura de enfriamiento a 23°C y la de retroceso de seguridad del sistema a 32°C. El control de humedad fue configurado para mantener valores entre 50 y 60%. Todas las opciones descritas estuvieron siempre programadas para funcionar en el horario de la biblioteca (9h-21h).

5.3.2. Ventilación Natural

Para las simulaciones utilizando la ventilación natural tanto para la de confort como para la nocturna, se utilizó la opción “Ventilación Natural Calculada” para un análisis más detallado, y además esta opción es necesaria para llevar a cabo los cálculos de CFD que fueron hechos con la opción final elegida. La “Ventilación Natural Calculada” permite el EnergyPlus calcular las tasas de flujo basado en el tamaño, configuración, posición y orientación de las aberturas en la estructura del edificio, así como minuto a minuto las condiciones física del aire, incluyendo la velocidad del viento, presión, temperaturas internas y externas, etc. [70].

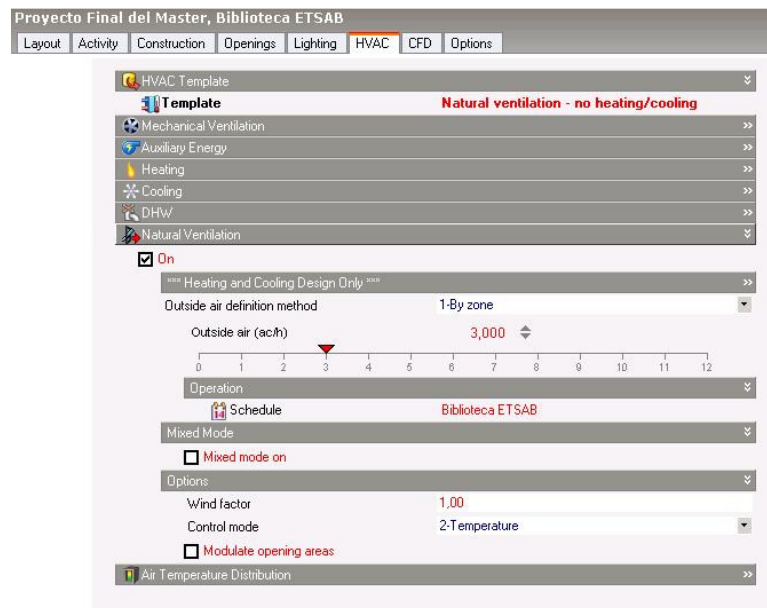


Figura 5.3: Configuración ventilación natural.

Fuente: El autor.

La temperatura de funcionamiento de la ventilación natural fue configurada a 0°C para no interferir en el funcionamiento de las ventanas por las noches, manteniéndolas siempre abiertas. Los horarios de funcionamiento de la ventilación natural siguió el horario de cada estrategia simulada. En todas las simulaciones se mantuvieron los cálculos de infiltraciones de 0,5 renovaciones/hora.

5.3.3. Ventanas

En las simulaciones de ventilación natural las aberturas de las ventanas fueron programadas para seguir el horario de la estrategia utilizada en la simulación. En las simulaciones de la primera situación, el edificio como está actualmente, se abrió 100% del área vidriada de las ventanas operables existentes, donde se puede ver sus localizaciones en la Figura 5.4.

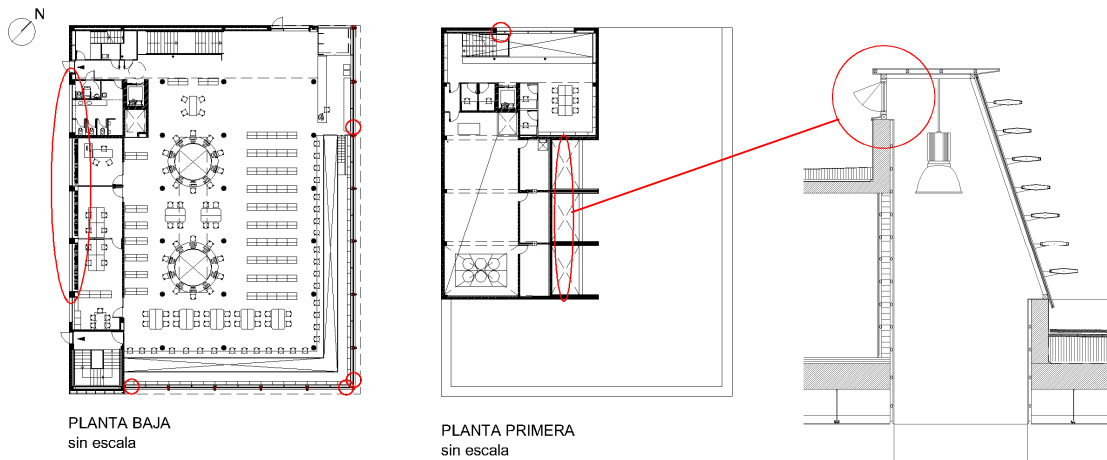


Figura 5.4: Localización de las ventanas operables existentes.

Fuente: El autor.

En las simulaciones de la segunda y tercera situación, edificio con más aberturas, las ventanas operables existentes de las oficinas, lavabos e iluminación cenital se mantuvieron abiertas al 100% de su área vidriada. Las ventanas del espacio de lectura, como tienen grandes dimensiones (tiene la altura de piso a techo), fueron simuladas todas abiertas al 50% de sus áreas vidriadas. Las ventanas de la planta primera que son un poco menores fueron simuladas todas abiertas al 70%. Fueron también abiertas 100% de las ventanas internas que ligan las oficinas al espacio de lectura para permitir la ventilación cruzada, y también el 70% de las que ligan el almacén al espacio de lectura en la planta sótano.

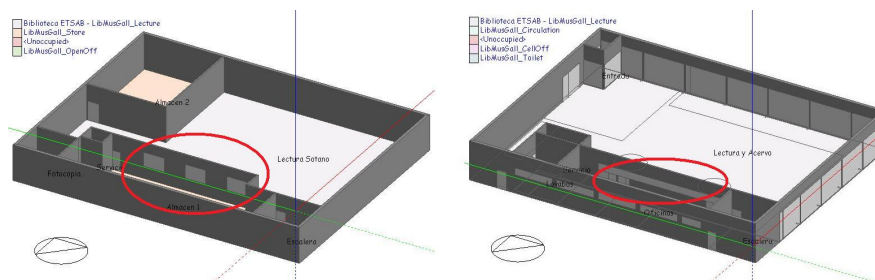


Figura 5.5: Localización de las ventanas internas planta sótano y planta baja.

Fuente: El autor.

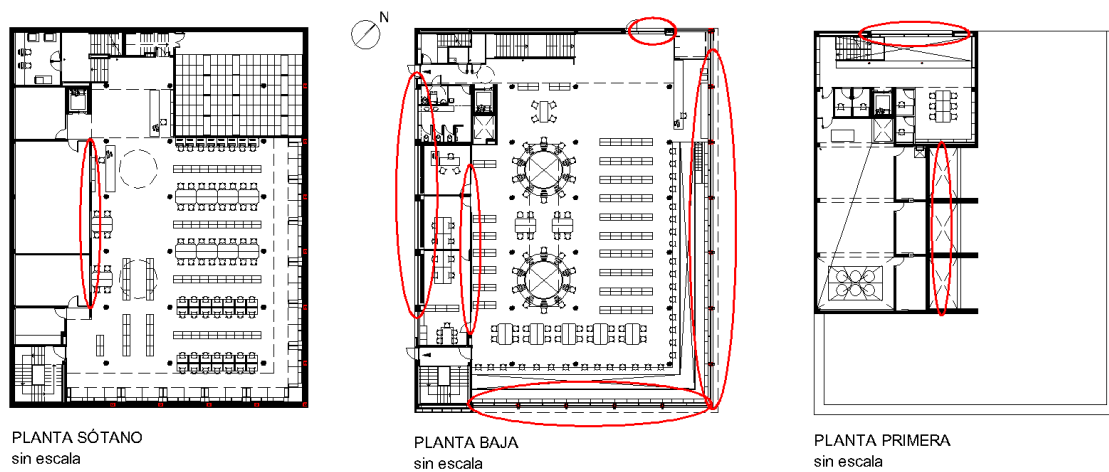


Figura 5.6: Localización de las ventanas operables en las simulaciones con más aberturas.

Fuente: El autor.

En las simulaciones de la tercera situación fueron configurados las lamas del proyecto original en todas las ventanas de las fachada Sur y Este en la planta baja.

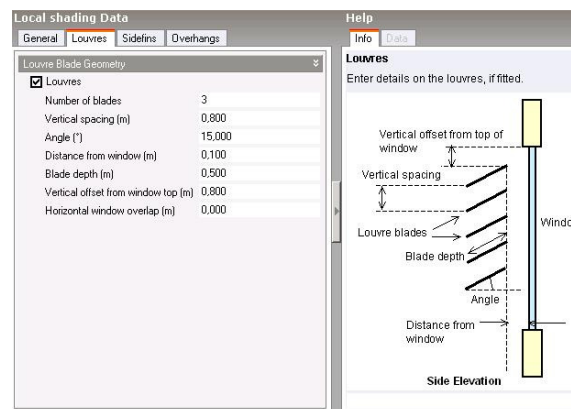


Figura 5.7: Configuración de las lamas en el programa.

Fuente: El autor.

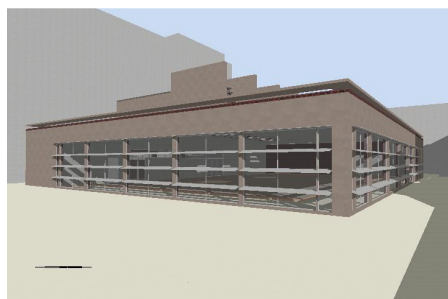


Figura 5.8: Imagen renderizada del modelo con las lamas.

Fuente: El autor.

5.4. RESULTADOS INICIALES Y ANÁLISIS

Todas las simulaciones fueron hechas en la semana de funcionamiento de la biblioteca que tenía el día más cálido del verano, día 24 de julio de 2002 (año base de los cálculos en el programa), para así situarnos en el peor caso para el confort en los análisis. El programa tiene muchos datos de salida a cada simulación, sin embargo iremos comentando los dos principales para este trabajo: las temperaturas de confort y los consumos de energía.

En los gráficos de temperatura, se muestra la temperatura de aire externa (color azul oscuro), temperatura del aire interior (en azul claro), temperatura radiante (en rojo) que es el promedio de las temperaturas de las superficies interiores, y la temperatura operativa (en verde) que es una combinación de las dos temperaturas anteriores, y por eso es la principal temperatura para evaluar el confort. En los gráficos de consumos de energía pueden ser vistos los principales tipos de consumo del edificio, siendo el principal para este trabajo el consumo del compresor del sistema de climatización (*chiller*) en azul claro.

5.4.1. Simulación de Referencia

En el gráfico de la Figura 5.9 se puede ver las temperaturas exterior e interiores del edificio simulado con las características actuales bajo el sistema de climatización.

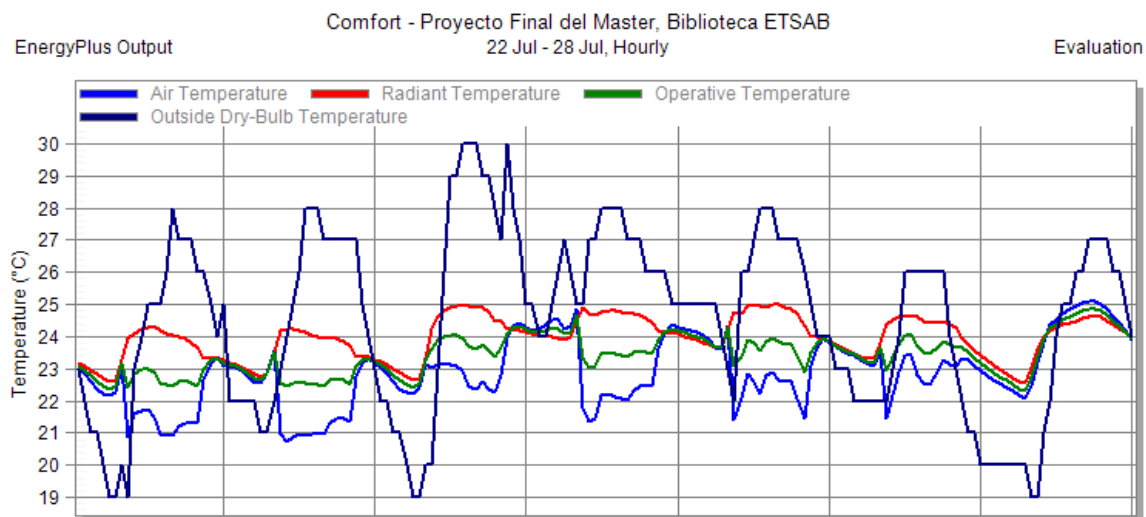


Figura 5.9: Resultados de confort de la simulación de referencia.

Fuente: El autor.

Es posible observar que durante el horario de funcionamiento de la biblioteca la temperatura operativa se mantiene en media en los 23°C programados en el sistema de climatización, sólo con mayores variaciones por las noches y en el domingo cuando el edificio está cerrado.

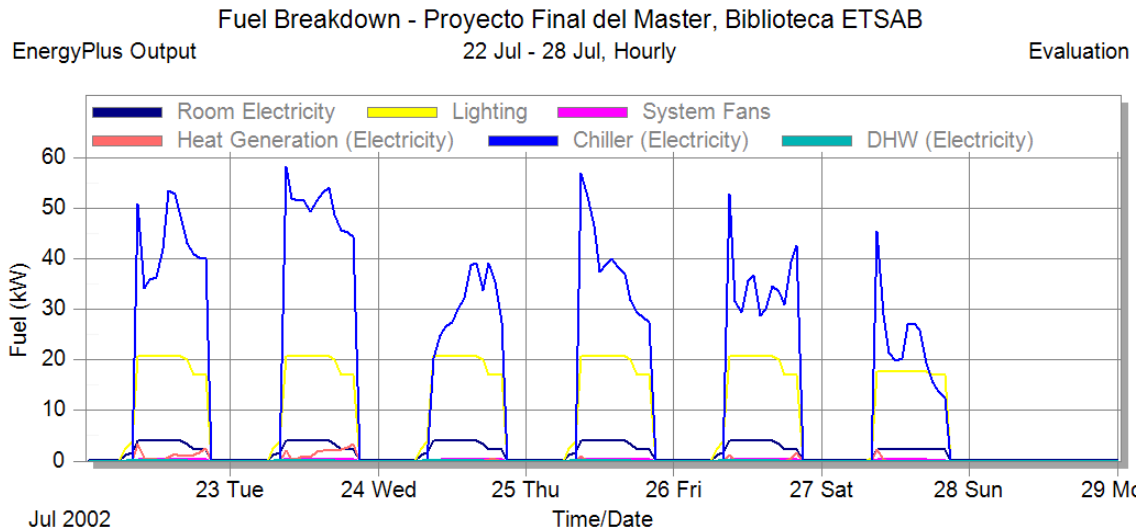


Figura 5.10: Resultados de los consumos de energía de la simulación de referencia.

Fuente: El autor.

Los consumos de energía son marcados por el horario de funcionamiento del edificio y tiene especial relevancia el consumo del compresor (en azul claro) que alimenta el sistema de aire acondicionado. El consumo del compresor varía de acuerdo con la necesidad de retirar el calor del interior del edificio, que por su vez, aumenta cuando el edificio recibe mucha radiación solar directa, en particular por las mañanas en las fachadas de vidrio. Aunque el día 24 fue el más cálido en temperatura absoluta, llegando a los 30°C, el consumo para climatización no fue de los mayores, con picos próximo de los 40KW sólo por la tarde. Esto puede ser explicado debido al horario que las temperaturas estaban más altas, por la tarde, y también por la inercia térmica del edificio gracias a su aislamiento, que provoca un retardo en calentar el interior, dejando un consumo mayor para más tarde o para el día siguiente. La mañana más fría del día 24 ha hecho también el sistema iniciar sin el pico de consumo usual para poner la temperatura interna al valor programado de 23°C, que se ve que ocurre en los otros días.

Después del consumo de climatización, viene el consumo para iluminación del edificio (en amarillo) como el más relevante, que tiene un valor casi constante entorno a los 20KW durante el horario de funcionamiento de la biblioteca. Los otros consumos internos de

energía quedan por debajo de los 5KW. En el domingo, cuando el edificio está cerrado, prácticamente no hay consumo de energía.

5.4.2. S-1.1: Edificio actual + ventilación de confort

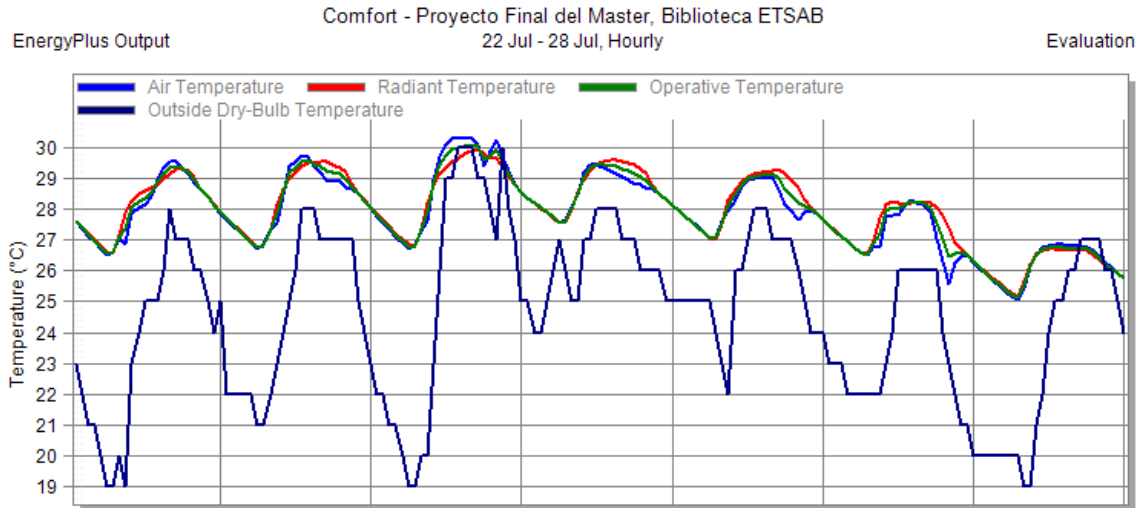


Figura 5.11: Resultados de confort de la simulación S-1.1.

Fuente: El autor.

Ahora es posible percibir claramente la variación interna de las temperaturas que siguen el patrón de libre fluctuación de la temperatura externa. Sin el sistema de aire acondicionado y sólo con las aberturas operables actuales abiertas durante el funcionamiento de la biblioteca, la temperatura interna llega en media a los 29,5°C durante esta semana y no baja mucho de los 27°C por las noches. Se puede percibir también que fuera del horario de funcionamiento del edificio, las temperaturas interiores del aire, radiante y operativa siguen bien similares, pues ya no hay la ventilación natural que provoca más variaciones en estas temperaturas.

En el consumo de energía, como ya se podía prever, no hay el consumo del sistema de climatización, y la iluminación pasa a ser el principal consumo del edificio que se mantiene entorno de los 20KW durante casi todo el horario de funcionamiento de la biblioteca, como se puede ver en la Figura 5.12. En las estrategias de ventilación de confort, en que no hay el sistema de climatización funcionando, el consumo de energía en esta semana será siempre el mismo e igual a este. Por eso, no enseñaremos más los consumos de las próximas simulaciones a continuación, sólo los de las estrategias de ventilación nocturna + climatización.

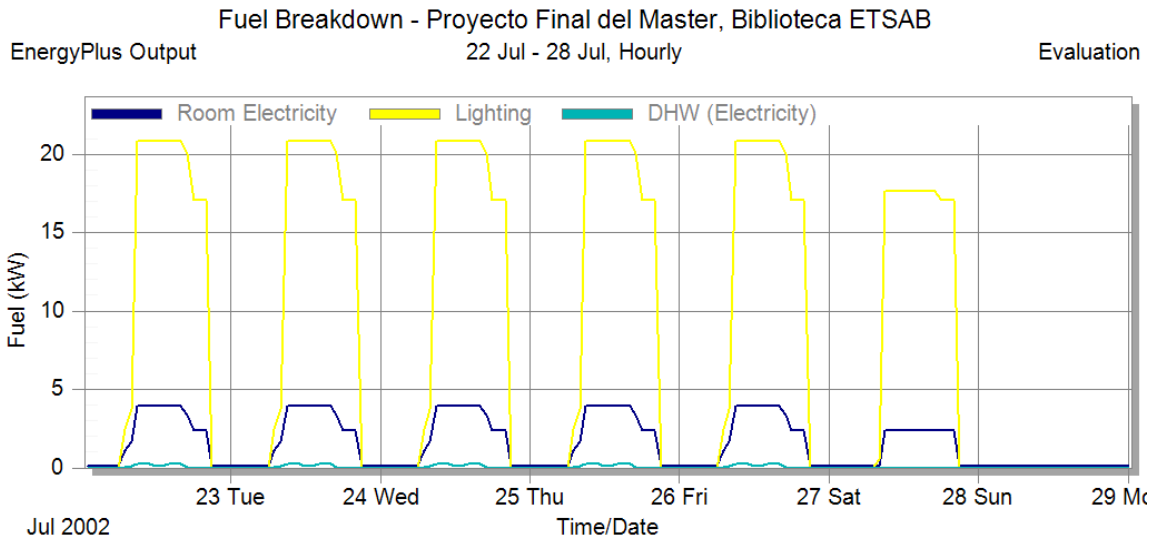


Figura 5.12: Resultados de los consumos de energía sin climatización.

Fuente: El autor.

5.4.3. S-1.2: Edificio actual + ventilación de confort y nocturna

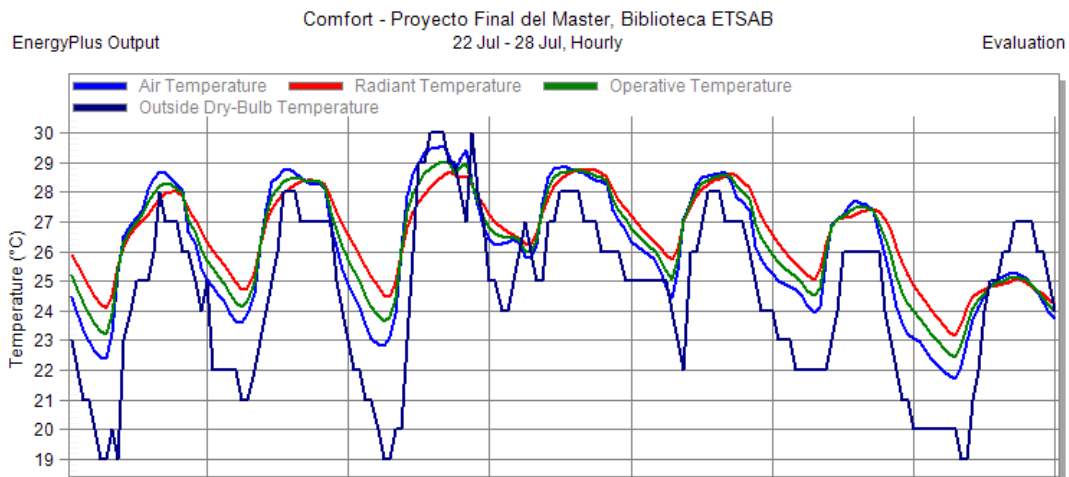


Figura 5.13: Resultados de confort de la simulación S-1.2.

Fuente: El autor.

Con la ventilación natural continuamente fluyendo en el interior del edificio, se percibe una relación todavía mayor de la temperatura interior con la externa. Las temperaturas interiores por las noches son mucho más bajas que en la opción de ventilación sólo de confort, y con esto el edificio se enfría y baja también las temperaturas durante el día siguiente. El pico medio de las temperaturas operativas pasó a ser entorno a 28,5°C, aproximadamente 1°C a menos que la alternativa anterior.

5.4.4. S-1.3: Edificio actual + ventilación nocturna y climatización

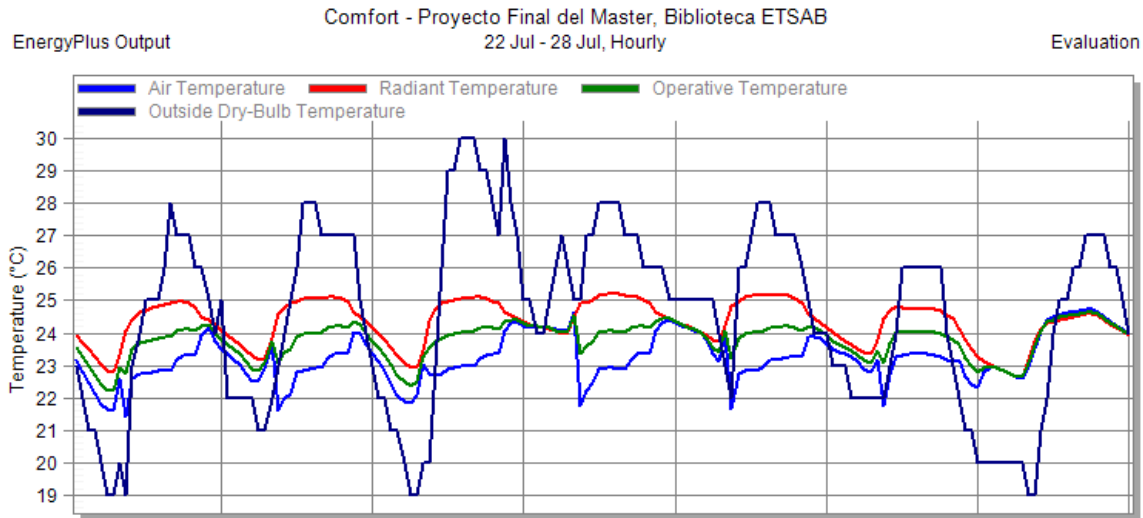


Figura 5.14: Resultados de confort de la simulación S-1.3.

Fuente: El autor.

Debido al sistema de climatización, no se percibe mucho el efecto de la ventilación nocturna en las temperaturas interiores del edificio. No obstante, se nota un cambio en el patrón del sistema en mantener las temperaturas interiores, como se hiciese menos esfuerzo en mantener la temperatura. La climatización intenta dejar siempre entorno de los 23°C la temperatura operativa durante el horario de funcionamiento de la biblioteca, y por las noches la ventilación natural no baja mucho más estas temperaturas que ya son bajas durante el día por causa del sistema.

Sin embargo, es muy visible la reducción significativa en los consumos de energía para la climatización gracias al efecto de la ventilación nocturna, como se puede observar en la Figura 5.15. Se mantiene en media el pico inicial, pero ahora menor, del consumo por las mañanas para poner la temperatura interior en la programada, y durante el día, el edificio que tuvo su estructura resfriada por la noche funciona como un receptor de calor que absorbe el calor generado internamente no necesitando así de más enfriamiento por el sistema de climatización para mantener la temperatura. Todo este calor absorbido durante el día es eliminado nuevamente por las noches con la ventilación natural, consiguiendo así reducir las cargas de enfriamiento del aire acondicionado diariamente. En el día 24, el consumo del sistema de climatización casi si iguala al de iluminación.

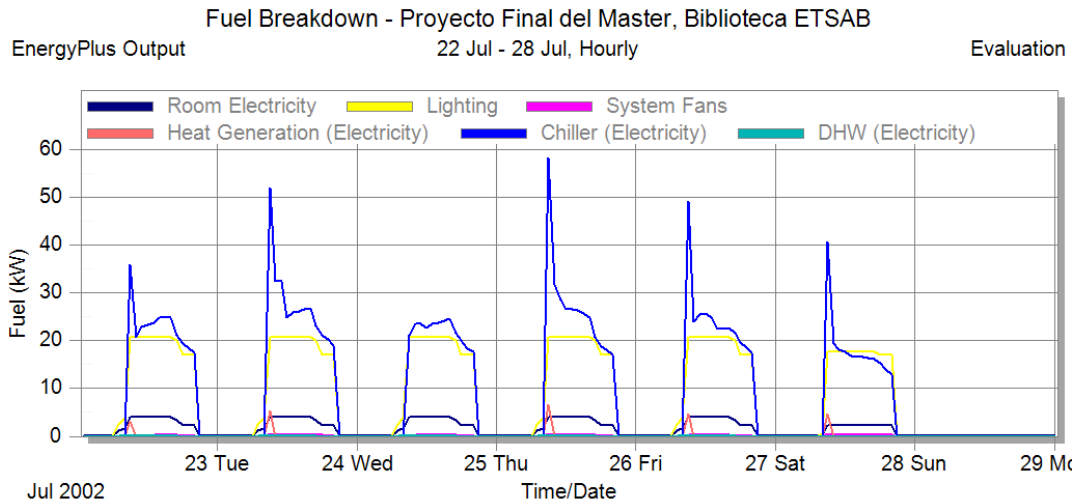


Figura 5.15: Resultados de los consumos de energía en la simulación S-1.3.

Fuente: El autor.

5.4.5. S-2.1: Edificio con más aberturas + ventilación de confort

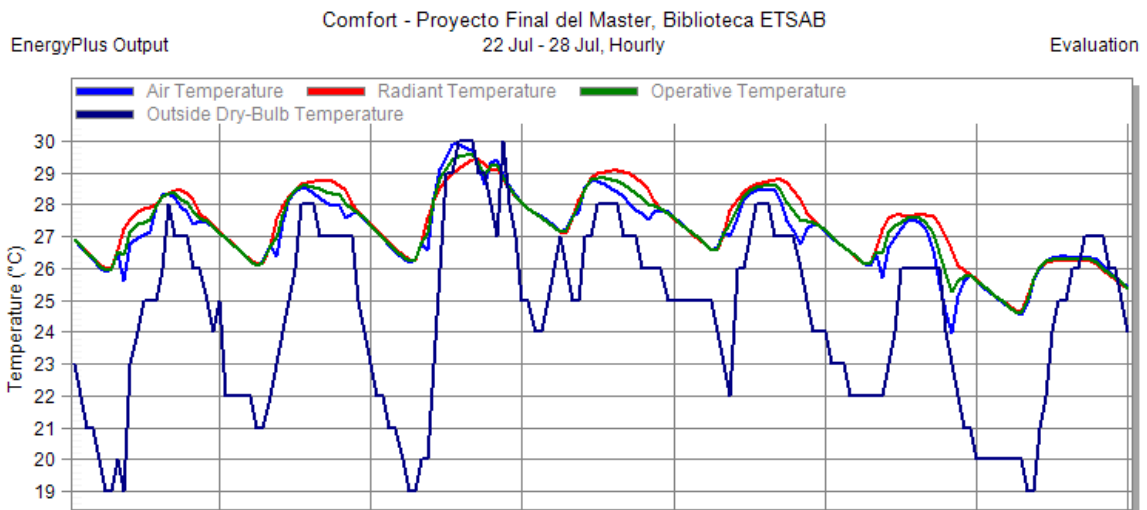


Figura 5.16: Resultados de confort de la simulación S-2.1.

Fuente: El autor.

En esta situación, del edificio con más aberturas que las actuales, es posible observar que hay una reducción significativa de las temperaturas durante el día en relación a la simulación S-1.1. Los picos diarios de las temperaturas operativas pasaron en media a los 28,5°C, o sea, una reducción aproximadamente en 1°C por el aumento del número de aberturas operables.

5.4.6. S-2.2: Edificio con más aberturas + ventilación de confort y nocturna

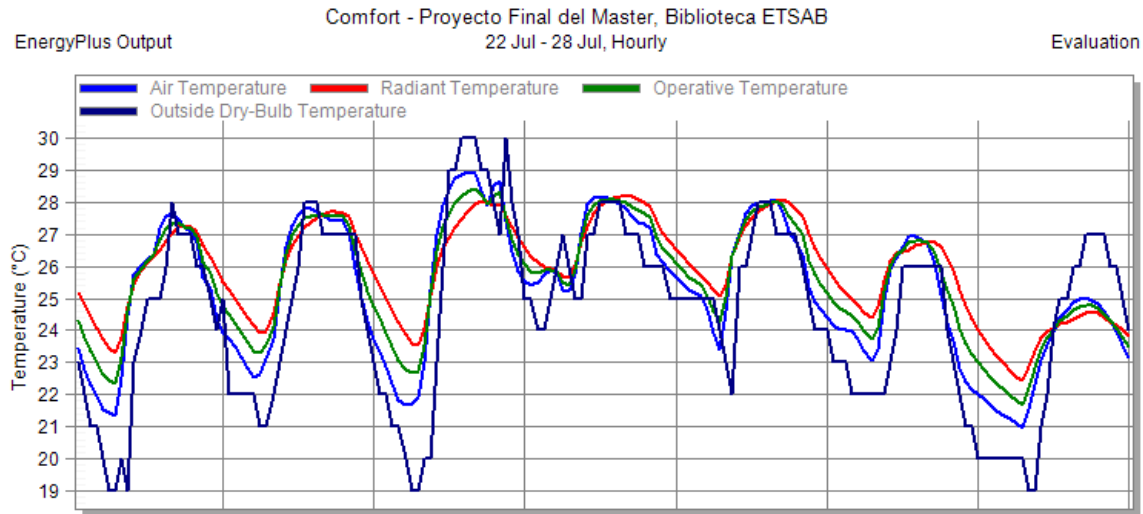


Figura 5.17: Resultados de confort de la simulación S-2.2.

Fuente: El autor.

Nuevamente, con la combinación de la ventilación de confort más la ventilación nocturna se llega a temperaturas interiores más similares a las externas, aunque ahora con el edificio con más aberturas, las temperaturas operativas bajan todavía más. Durante las mañanas la biblioteca inicia su funcionamiento con temperaturas mucho más agradables que la alternativa de ventilación sólo de confort. Los picos de temperatura operativa quedan entorno de los 27,7°C, reduciendo casi 1°C en relación a la simulación anterior y a la simulación S-1.2 (edificio actual).

5.4.7. S-2.3: Edificio con más aberturas + ventilación nocturna y climatización

Ahora, con el edificio con más aberturas, es posible ver un efecto un poco mayor de la ventilación nocturna en las temperaturas interiores por la noche, que pasaron a ser más similares a la externa, en comparación a la situación del edificio con las aberturas actuales (simulación S-1.3), como se puede ver en la Figura 5.18.

En esta situación, edificio con más aberturas, la reducción del consumo del aire acondicionado por causa de la ventilación nocturna ya no es mucho mayor que con las aberturas actuales, sin embargo es significativo. Aunque no tan visible en una semana, la diferencia se tornará grande en un periodo más largo. En esta alternativa, se puede ver en la

Figura 5.19 que en el día 24, la climatización tiene prácticamente el mismo consumo que la iluminación en el edificio.

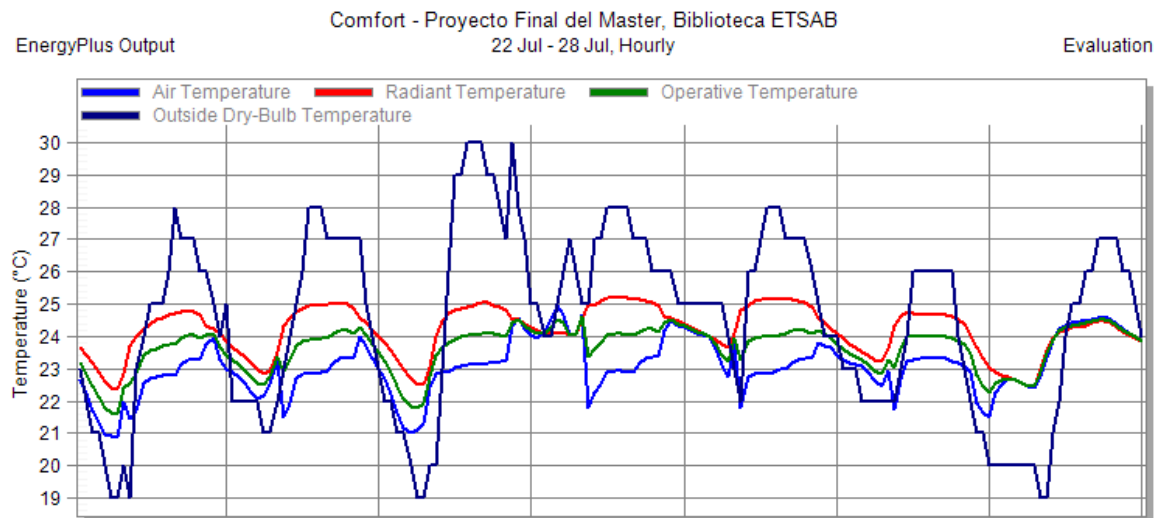


Figura 5.18: Resultados de confort de la simulación S-2.3.

Fuente: El autor.

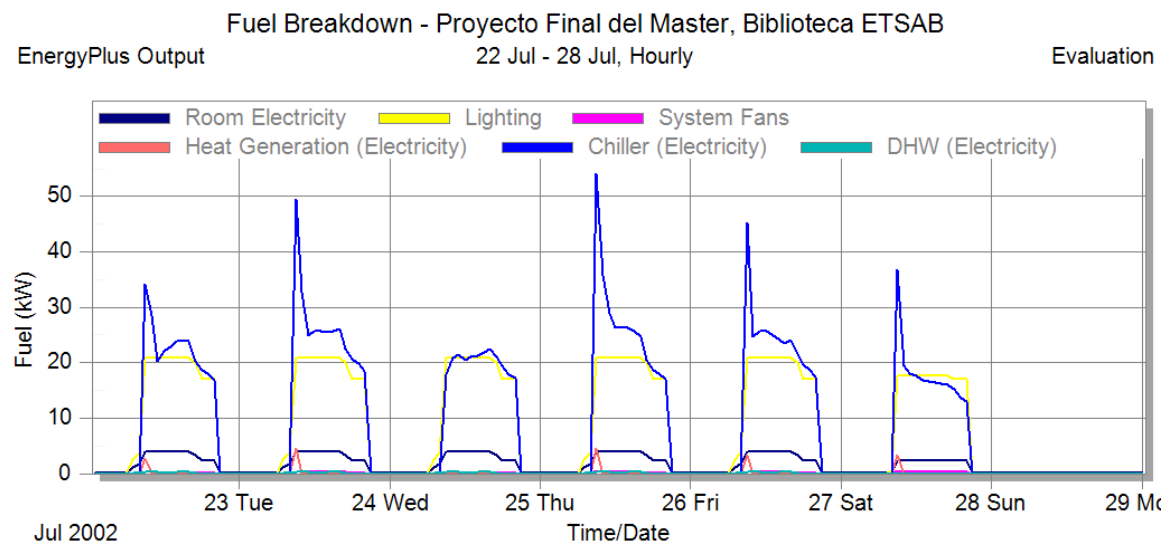


Figura 5.19: Resultados de los consumos de energía en la simulación S-2.3.

Fuente: El autor.

5.4.8. S-3.1: Edificio con lamas y más aberturas + ventilación de confort

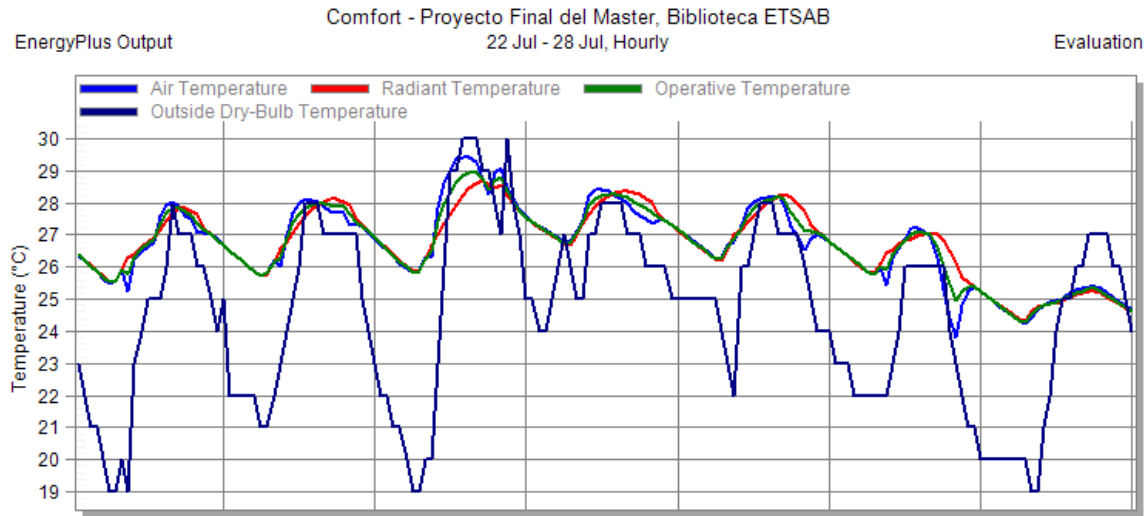


Figura 5.20: Resultados de confort de la simulación S-3.1.

Fuente: El autor.

En la tercera situación creada, más abertura y ahora con las lamas del proyecto original, se puede ver una mejora sensible en las temperatura interiores al proteger más el edificio de las ganancias de calor solares. En esta opción de funcionamiento sólo con la ventilación de confort, los picos de las temperaturas operativas llegan en media a los 28°C, o sea, 1,5°C menos que en la situación actual de edificio con esta estrategia. Con esto, la temperatura interior prácticamente se iguala al exterior en los horarios más cálidos del día. Pero por las noches, con las ventanas cerradas, las temperaturas operativas no bajan mucho quedando en media próximo a los 26°C en esta semana.

5.4.9. S-3.2: Edificio con lamas y más aberturas + ventilación de confort y nocturna

Gracias a la protección solar de las lamas, las estrategias de la ventilación de confort en conjunto con la ventilación nocturna consiguen dejar las temperaturas interiores prácticamente iguales a la externa durante todo el día, y en algunos casos inferior, particularmente en los horarios más cálidos del día. La variación de las temperaturas operativas interiores queda en media entre los 23°C por las noches y con picos en media de 27,3°C en esta semana. Esto representa una reducción de casi 1°C en relación a la alternativa anterior, y de más de 1°C cuando comparada con misma estrategia en la situación actual del edificio.

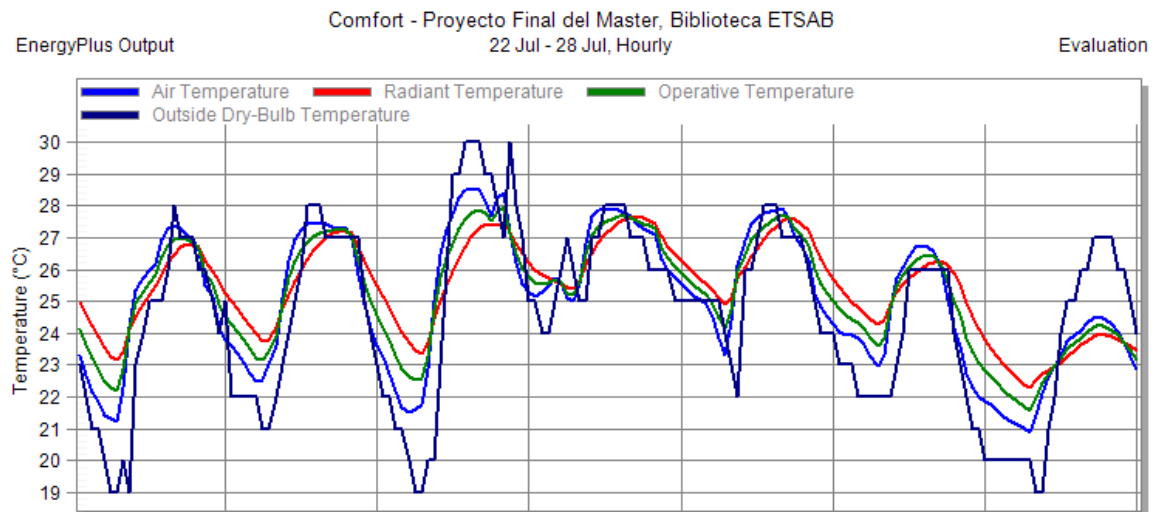


Figura 5.21: Resultados de confort de la simulación S-3.2.

Fuente: El autor.

5.4.10.S-3.3: Edificio con lamas y más aberturas + ventilación nocturna y climatización

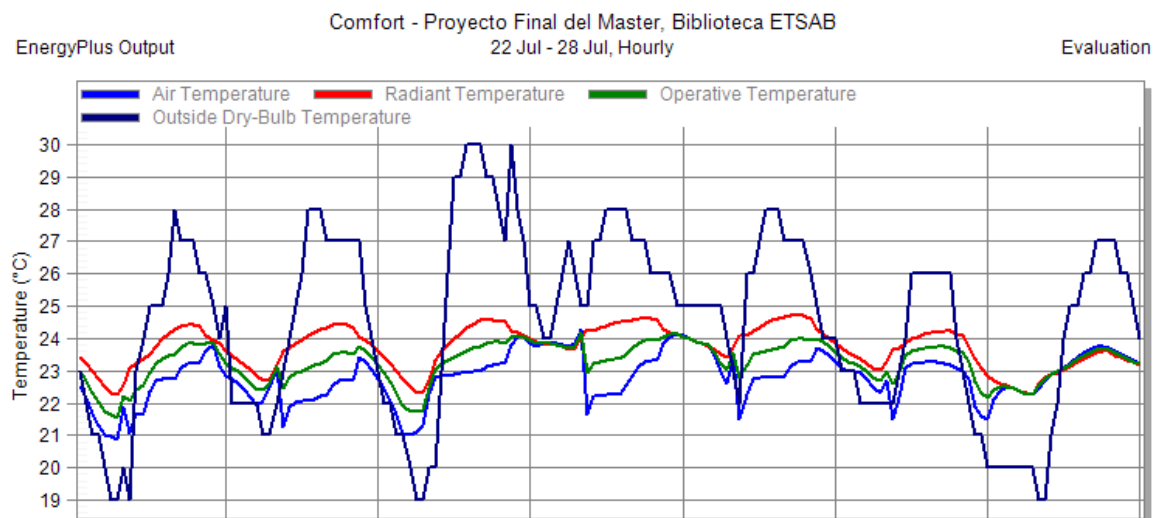


Figura 5.22: Resultados de confort de la simulación S-3.3.

Fuente: El autor.

El edificio con más aberturas y con las lamas ha hecho que la ventilación nocturna consiguiese bajar aún más las temperaturas por las noches, llegando a valores más próximos a la temperatura externa. Las lamas impiden una mayor ganancia solar del edificio

y hacen que, con la ventilación nocturna retirando la misma cantidad de calor, baje más las temperaturas interiores cuando se compara con la situación sin las protecciones solares.

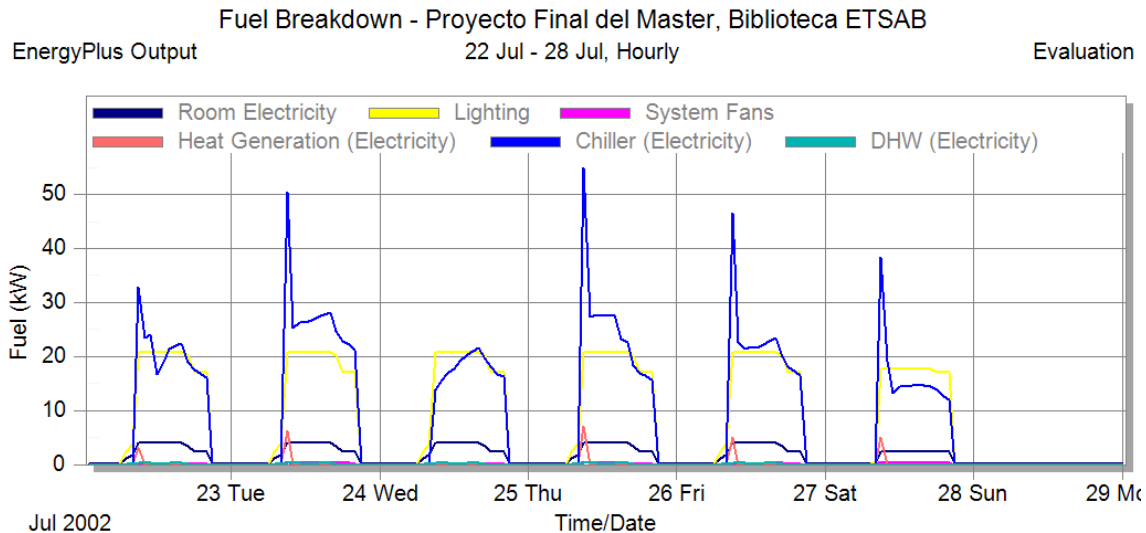


Figura 5.23: Resultados de los consumos de energía en la simulación S-3.3.

Fuente: El autor.

Mas una vez, es difícil visualizar las diferencia entre el consumo de esta situación con las situaciones anteriores, sin embargo si consideramos el mismo día 24 como referencia, es posible comprobar que ahora el consumo de energía para la climatización fue menor que el consumo para la iluminación gracias a las lamas.

5.5. COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS

En el gráfico de la Figura 5.24 se puede ver un resumen de todos los resultados de las estrategias de la ventilación de confort trabajando sólo o en conjunto con la ventilación nocturna. Analizando los resultados, se puede observar que las estrategias combinadas de ventilación natural para confort y ventilación natural nocturna (en tonos de azul) producen resultados mejores que sólo la ventilación de confort (en tonos de rojo). Es posible ver también que cada mejora en la situación simulada, como aumento de las aberturas y colocación de las lamas, influyen directamente para la reducción de las temperaturas internas durante los días cálidos del verano.

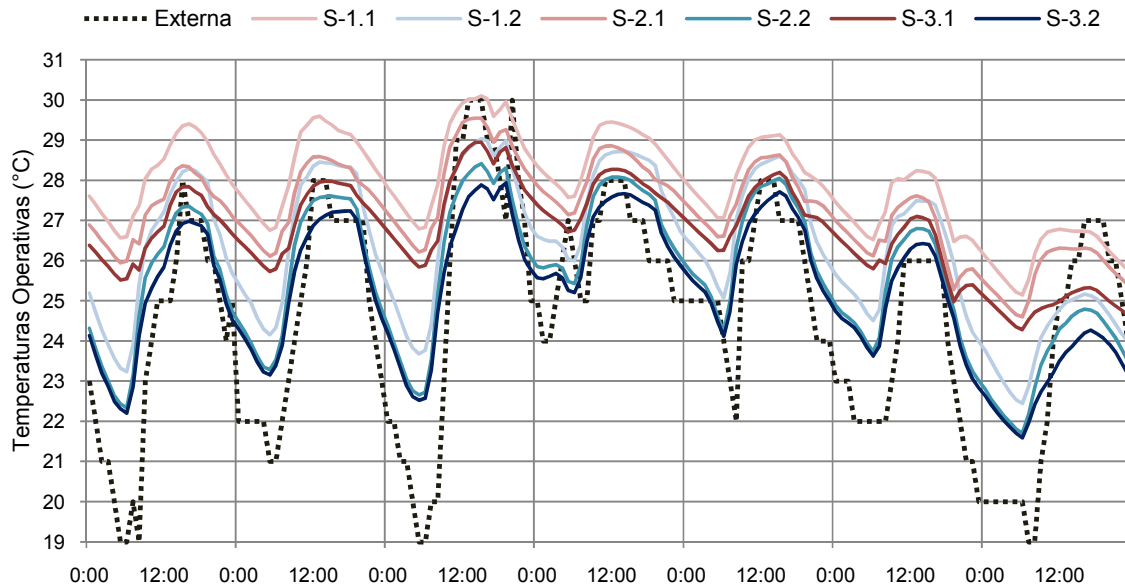


Figura 5.24: Comparación de las simulaciones sólo con ventilación natural.

Fuente: El autor.

Cuando comparamos todas estas estrategias juntas, podemos ver que el edificio como está actualmente y utilizando las estrategias de ventilación de confort y nocturna juntas (S-1.2), produce una reducción en las temperaturas interiores durante el día similares o un poco mejores que la situación con más aberturas funcionando sólo con la ventilación de confort (S-2.1). Esto demuestra el efecto significativo de la ventilación nocturna en bajar las temperaturas interiores del día siguiente.

La mejor de estas situaciones y estrategias es sin duda la simulación S-3.2, en que el edificio tiene más aberturas y las lamas, y utiliza tanto la ventilación de confort como la nocturna. Esta alternativa fue la que consiguió reducir más las temperaturas interiores durante el día, llegando hasta valores en media por debajo de las temperaturas externas durante los picos diarios de temperatura por la tarde.

A continuación, en la Figura 5.25 podemos comparar los consumos de energía para todo el verano para las estrategias de ventilación nocturna en conjunto con el sistema de climatización, comparando también con la simulación de referencia y con las estrategias sin climatización. Es posible ver claramente que la ventilación nocturna reduce bastante el consumo de energía para la climatización, incluso aplicándola en el edificio como está actualmente. Cada mejora adicional en el edificio, produjo una reducción similar en el consumo total. Con las lamas (S-3.3), es posible ver que esta estrategia redujo más de 11.000KW de energía al año comparada la simulación de referencia del edificio actual. La

protección solar de las lamas redujo las ganancias de calor durante el día mejorando todavía más el funcionamiento de esta estrategia de enfriamiento. En la Figura 2.26 es posible ver las emisiones de CO₂ en el verano de cada una de estas opciones según el programa.

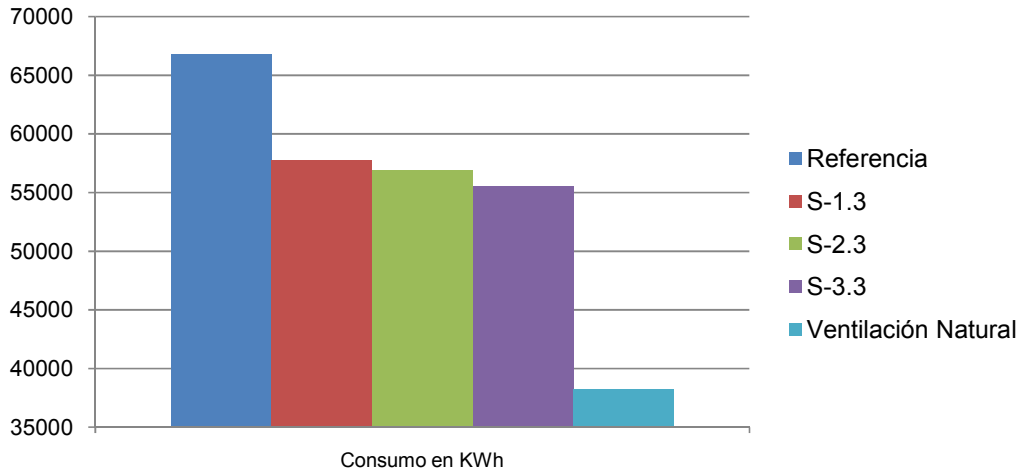


Figura 5.25: Consumos de energía en KWh en el verano de cada opción simulada.

Fuente: El autor.

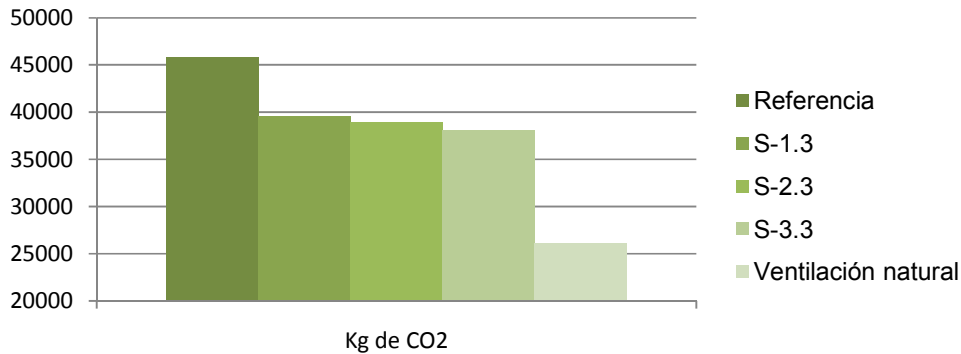


Figura 5.26: Emisiones de CO₂ en Kg en el verano de cada opción simulada.

Fuente: El autor.

Sin embargo, es incomparable la reducción energética que las alternativas sólo con ventilación natural proporcionan al edificio al eliminar el consumo del aire acondicionado. Esta reducción llega a más de 28.500KWh al año. Por eso, como el objetivo de este trabajo es buscar la opción que más mejore la eficiencia energética del edificio, la opción escogida para un análisis más detallado con la herramienta CFD fue de la simulación S-3.2, el edificio con más aberturas y con las lamas, utilizando las estrategias de ventilación de confort durante el día en conjunto con la ventilación nocturna.

5.6. SIMULACIÓN DE DINÁMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL (CFD)

Todos los análisis hechos hasta el momento fueron para el edificio como un todo. A continuación, para la alternativa elegida, iremos realizar un análisis más profundizado de los espacios interiores del edificio con la simulación CFD. Con esta herramienta será posible ver mejor las temperaturas interiores, conocer las distribuciones de calor en los ambientes y comprender el patrón de los flujos de aire internamente.

5.6.1. Configuraciones del Contorno

Para la simulación de Dinámica de Fluidos Computacional se utilizaron como condiciones de contorno los resultados de los cálculos hechos en la simulación del EnergyPlus almacenados automáticamente por el DesignBuilder. Para esto, en las opciones del programa se marcó la opción para almacenar los datos de salida de superficies, como se ve en la Figura 5.27.



Figura 5.27: Configuraciones de los datos que se almacenaron para el CFD .

Fuente: El autor.

En la simulación CFD se importaron los datos del día y hora más cálida en el interior del edificio observado en la simulación S-3.2, que fue el día 24 de julio a las 16:00h. El análisis CFD funciona como una foto de la situación en un momento determinado. En este día y hora la temperatura operativa media interior del edificio estaba entorno de los 28°C y la temperatura externa estaba en los 30°C. Con esto, vamos a analizar la distribución de las temperaturas interiores en la peor situación posible.

5.6.2. Resultados y Análisis

FLUJOS DE AIRE

En las imágenes a continuación se puede analizar el comportamiento de los flujos de aire que penetran en el edificio, con sus direcciones y velocidades en el momento exacto escogido. Con esto, podemos tener una idea general del comportamiento de la ventilación natural en los días de verano en este objeto de estudio.

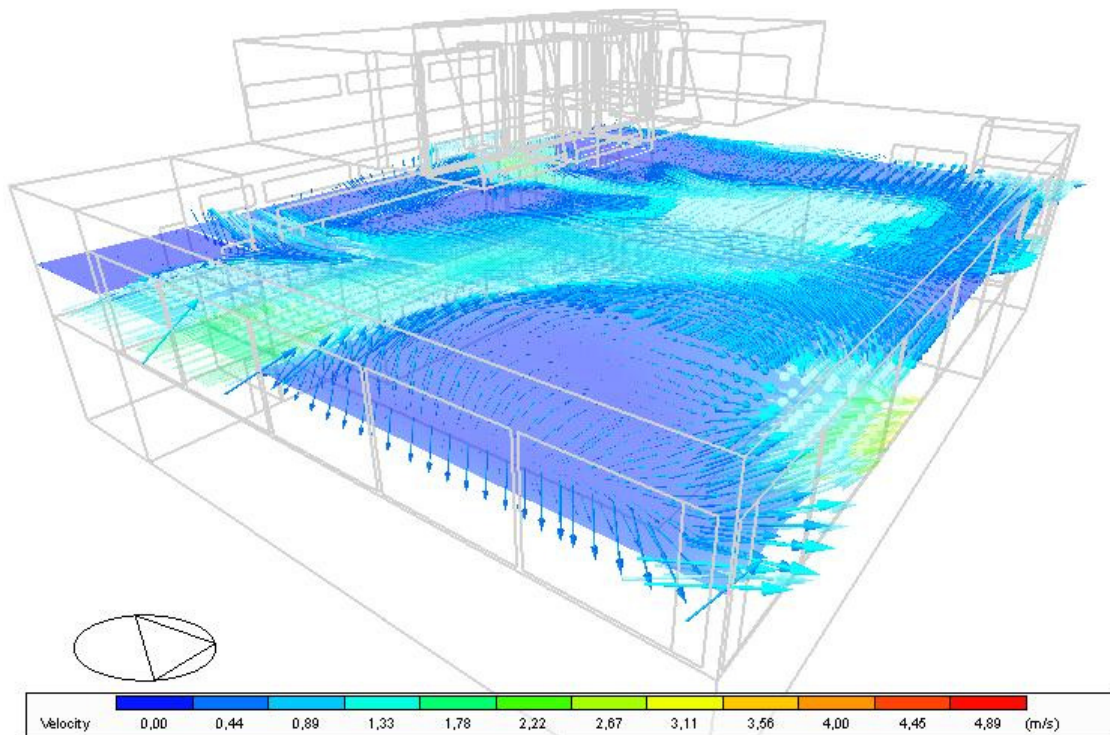


Figura 5.28: Flujos de aire en el interior de edificio

Fuente: El autor.

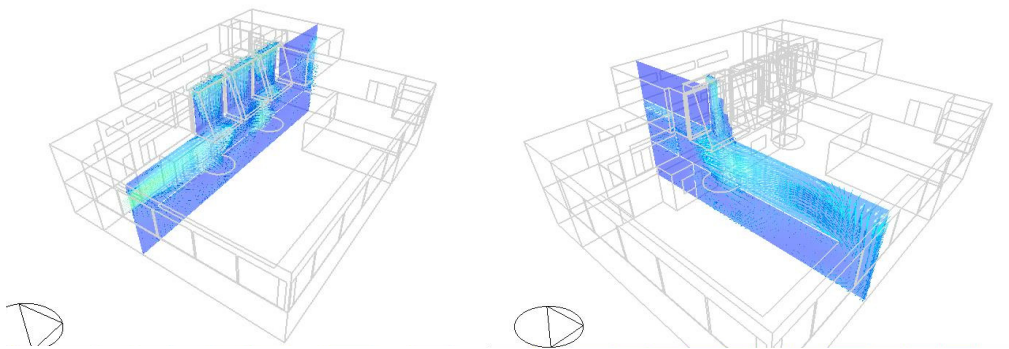


Figura 5.29: Secciones longitudinal y transversal

Fuente: El autor.

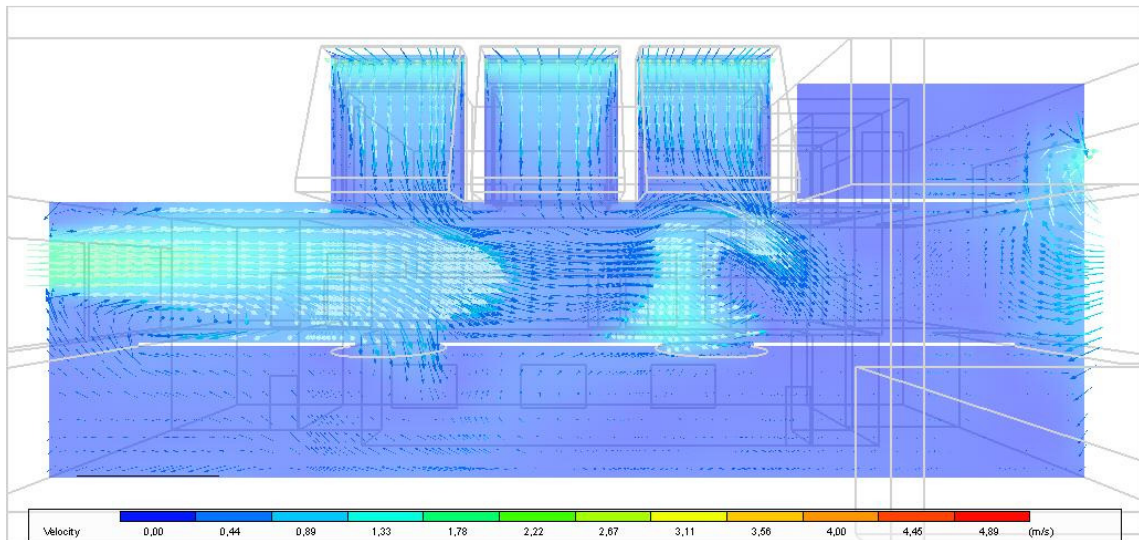


Figura 5.30: Sección longitudinal

Fuente: El autor.

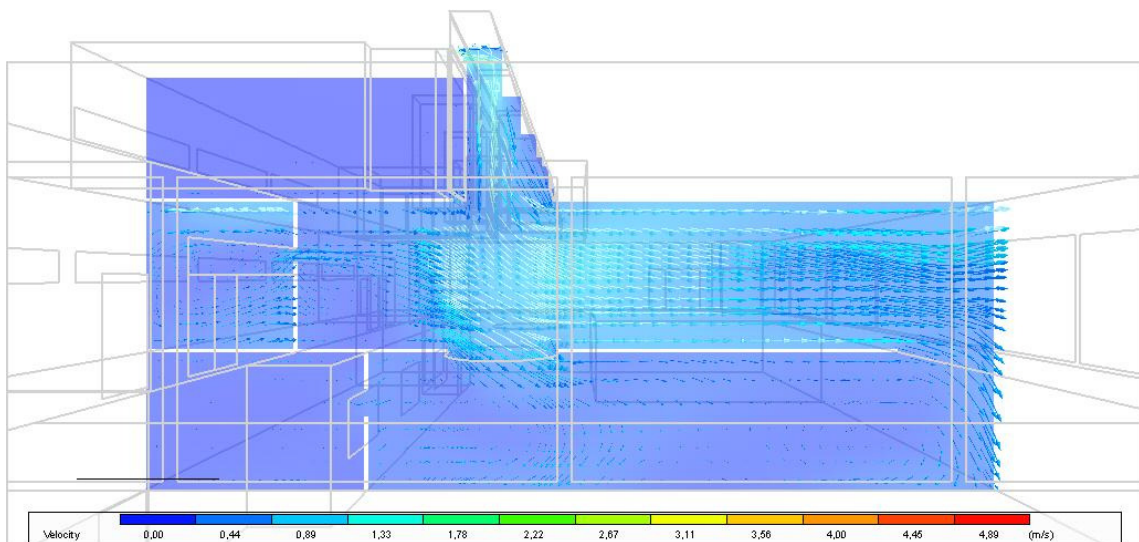


Figura 5.31: Sección transversal

Fuente: El autor.

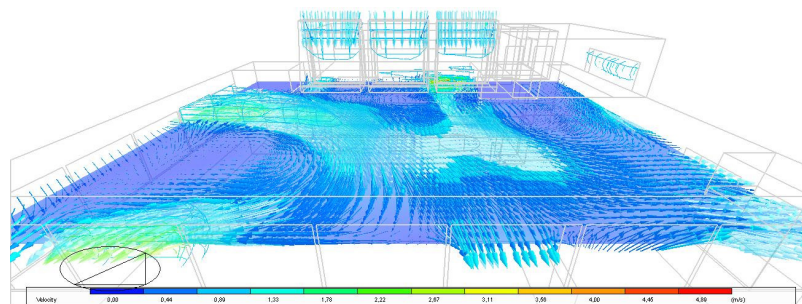


Figura 5.32: Vista flujos de aire planta baja

Fuente: El autor.

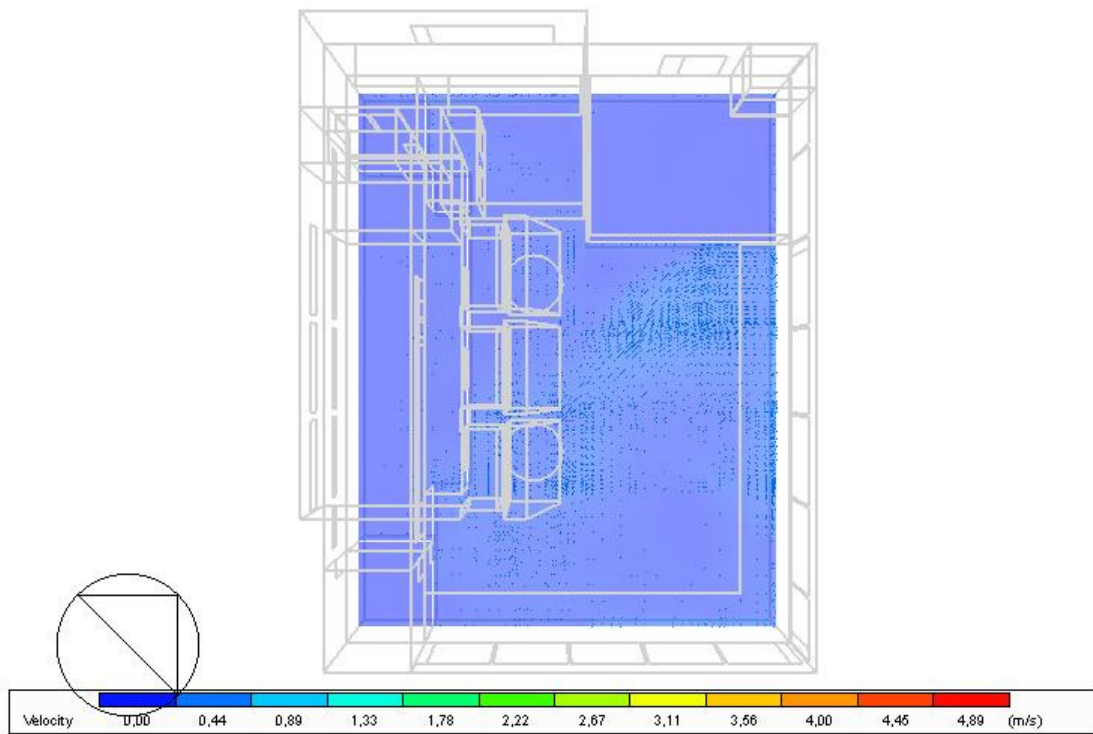


Figura 5.33: Flujos de aire planta sótano.

Fuente: El autor.

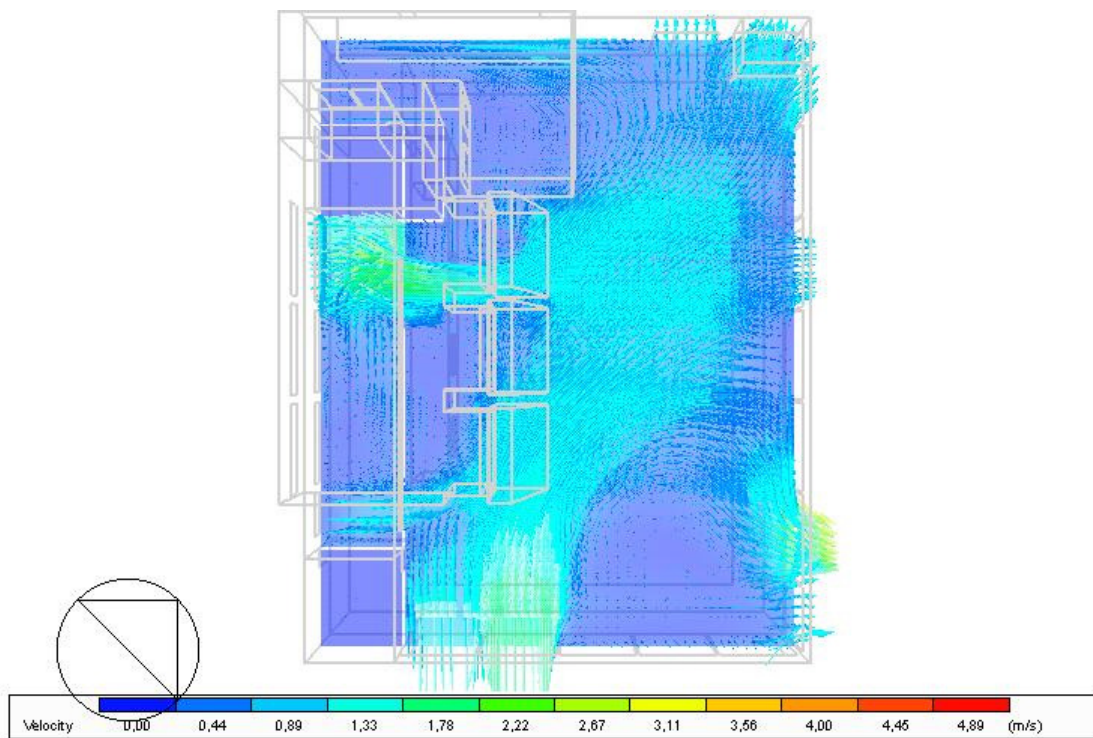


Figura 5.34: Flujos de aire planta baja.

Fuente: El autor.

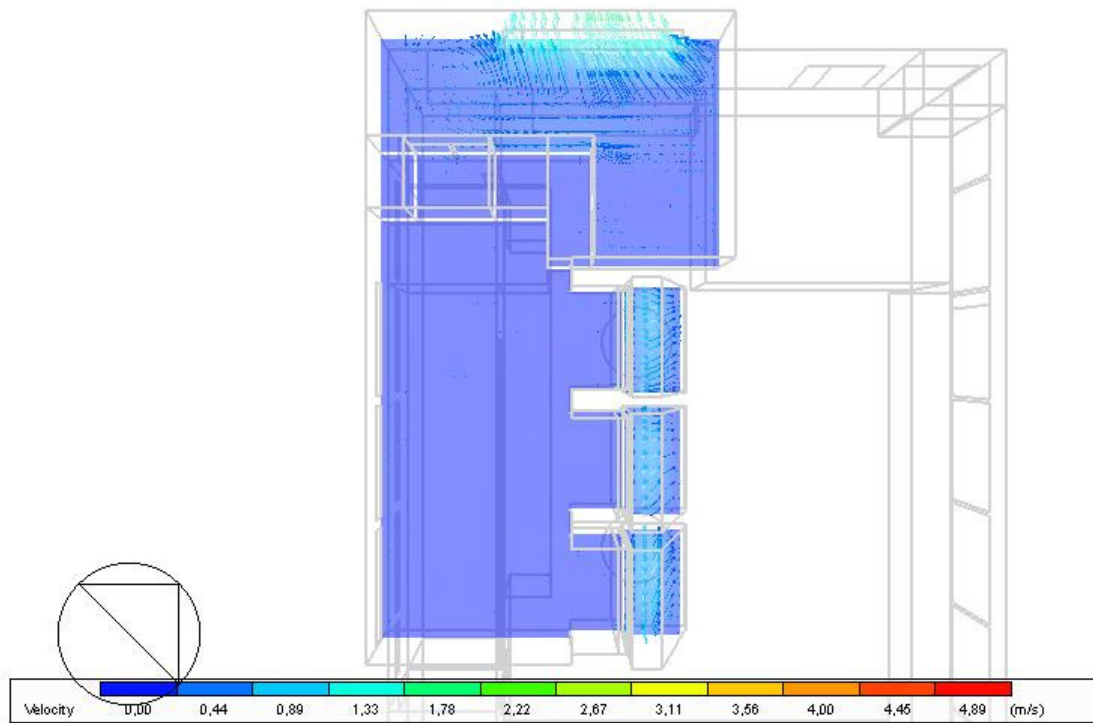


Figura 5.35: Flujos de aire planta primera.

Fuente: El autor.

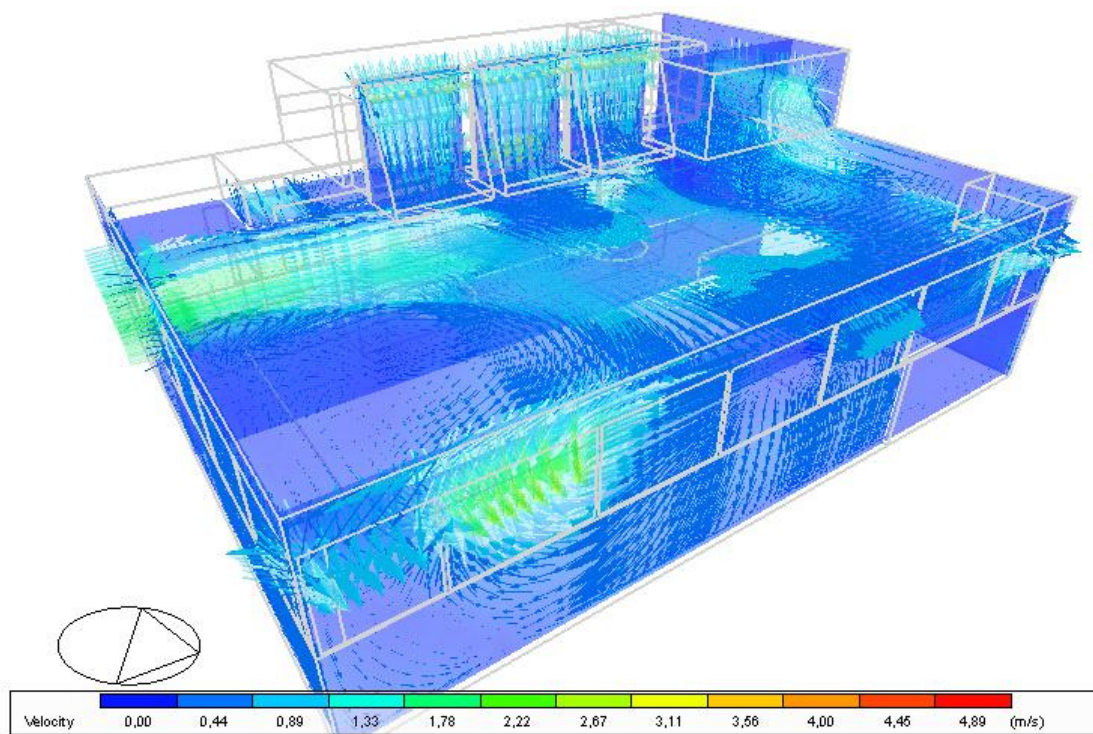


Figura 5.36: Flujos de aire en todo el edificio. Vista Este.

Fuente: El autor.

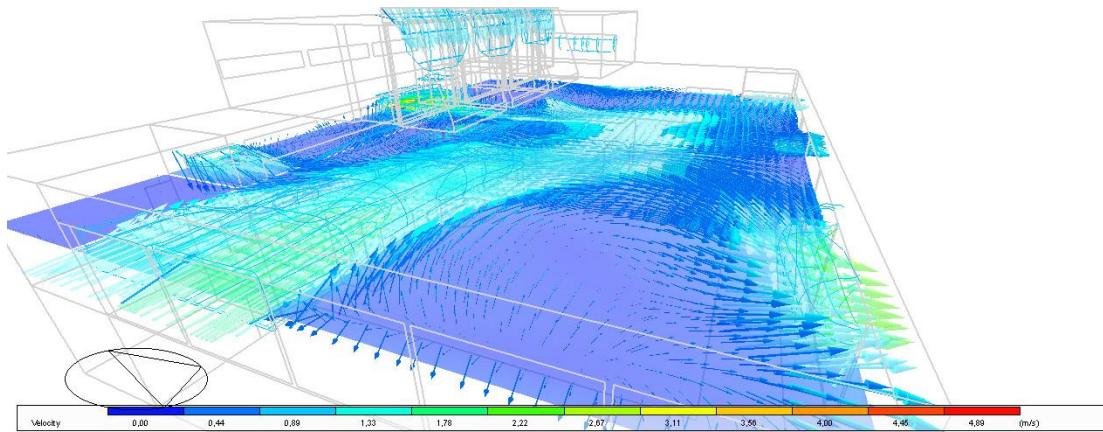


Figura 5.37: Flujos de aire en la planta baja.

Fuente: El autor.

Analizando los flujos interiores, es posible ver que los vientos vienen del Sur y se adentran por las ventanas de las fachadas Sur y Oeste del edificio, las fachadas a barlovento. Parte de estos flujos barren la planta baja y salen por las ventanas a sotavento en las fachadas Norte y Este, induciendo así la ventilación cruzada en el edificio. Las aberturas en las cajas de iluminación cenital de la planta primera, al revés de funcionar como salida de aire por el efecto chimenea como se podía pensar, por estar a barlovento en el verano, funcionan como un captador de viento.

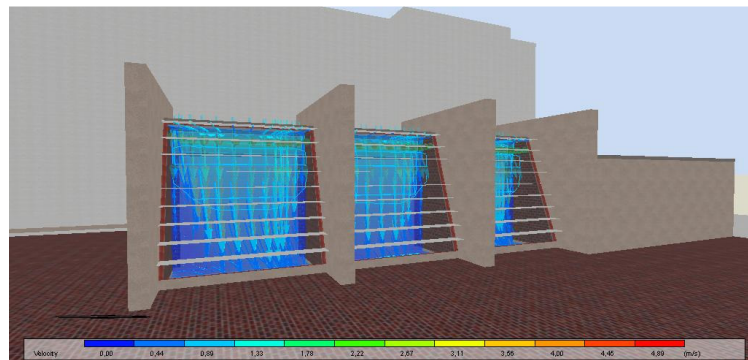


Figura 5.38: Flujos de aire entrando por las aberturas en las cajas de iluminación cenital.

Fuente: El autor.

Es interesante ver que los flujos de aire no penetran al mismo tiempo por todas las ventanas de las fachadas a barlovento aunque estén abiertas. El viento externo tiene patrones de comportamiento complejos también e influenciados por muchos factores, de entre ellos los obstáculos del entorno. Él viene de su dirección predominante pero es desviado por las construcciones en el camino y puede asumir diversos patrones diferentes.

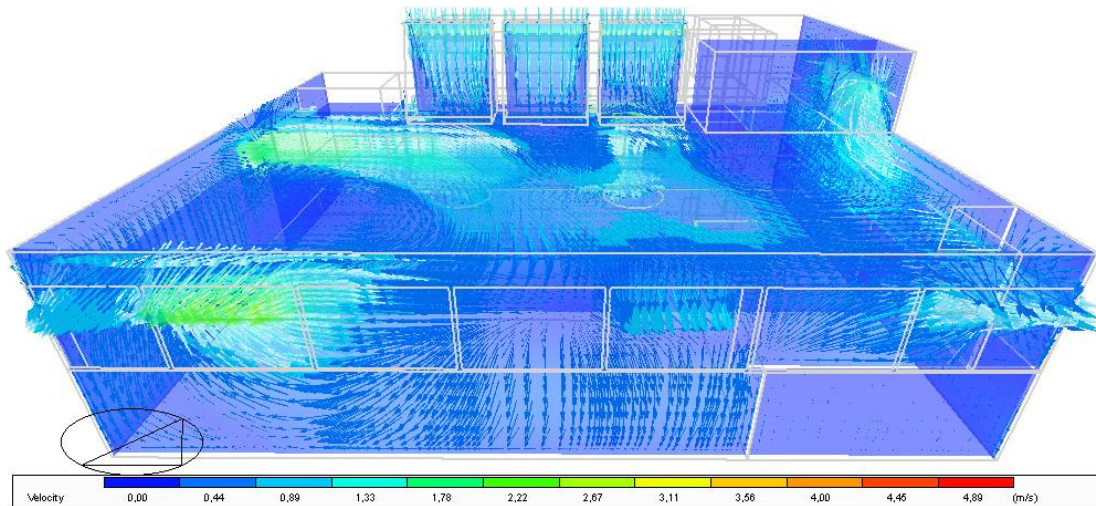


Figura 5.39: Flujos de aire en todo el edificio. Vista fachada Este.

Fuente: El autor.

Es posible ver que los flujos que penetran con más velocidad por las ventanas de las oficinas y del gran espacio de lectura se cruzan con los que penetran por las aberturas de arriba, y crean una compleja turbulencia en el interior que hace que los flujos de aire tomen diversos sentidos. Algunos salen en velocidades más altas “succionados” por las presiones negativas creadas por el viento en ventanas de las fachada Norte y Este, y otros acaban circulando por la planta baja o bajando para la planta sótano a velocidades más bajas. Este intercambio del aire exterior con el interior resulta también en una mezcla de temperaturas y hace una distribución más homogénea del calor en los espacios.

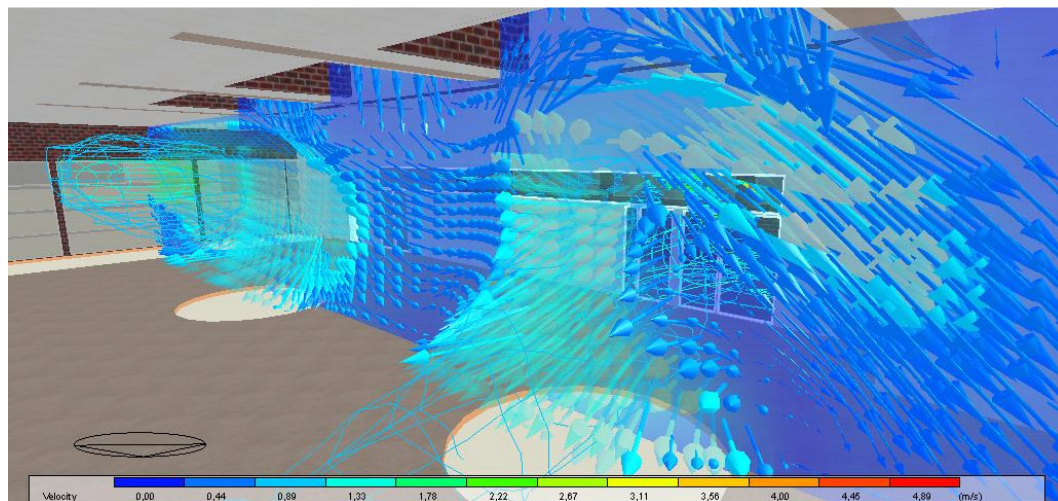


Figura 5.40: Flujos de aire en el interior de la planta baja.

Fuente: El autor.

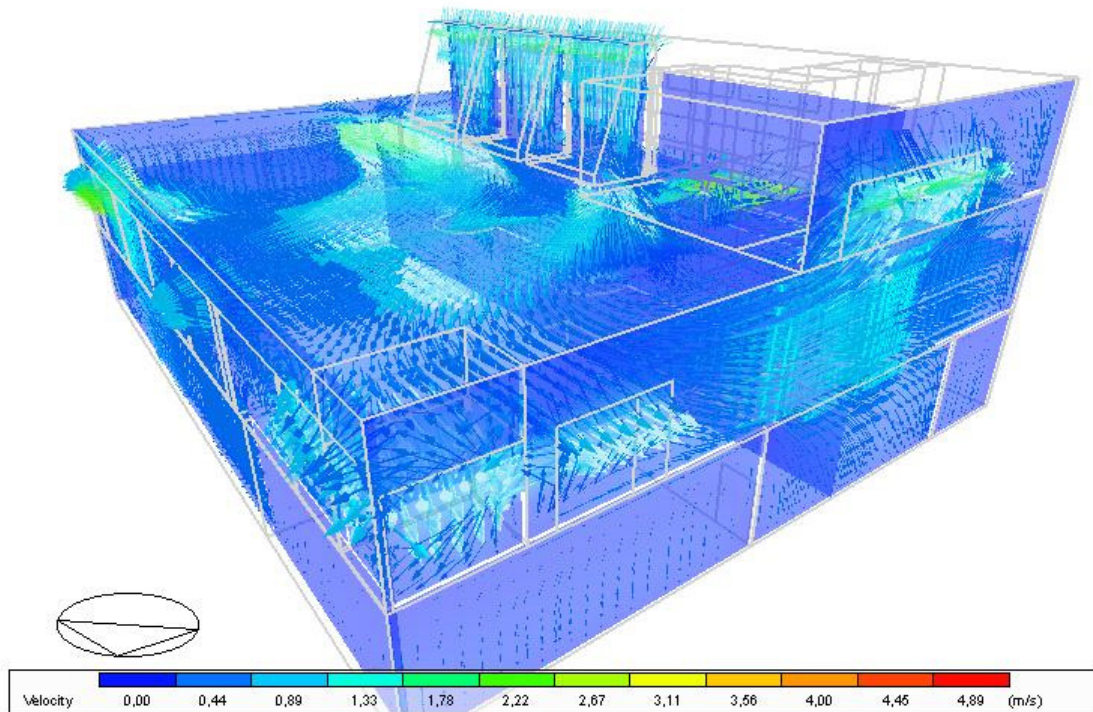


Figura 5.41: Flujos de aire en todo el edificio. Vista fachadas Este y Norte.

Fuente: El autor.

Como apenas una pequeña parte de los flujos de aire que penetran al edificio bajan a la planta sótano, en este nivel la ventilación ocurre principalmente por la llamada ventilación por mezclado, conducida por el efecto Stack, en que el aire más fresco interior baja y el más cálido de este nivel asciende. Por eso, casi no se observan velocidades considerables de flujos de aire en la planta sótano. Sin embargo, en la planta baja, que tiene la ventilación cruzada inducida por el viento, es donde se ve las velocidades más altas de los flujos de aire en este momento analizado. Los valores llegan entre 1,33 y 1,78 m/s, que están dentro de lo adecuado para no crear problemas internos, cómo papeles volando por ejemplo.

En la planta primera se observa que las ventanas están funcionando como salida del aire que se adentra en la planta baja y sube por el hueco de la escalera, no creando casi una ventilación para los espacios en este nivel. Aunque el aire sale con cierta velocidad por la ventana, en el espacio de lectura el aire permanece a bajas velocidades. En este nivel, la ventilación natural está restringida básicamente al método unilateral, no siendo muy adecuado debido a la baja altura de piso a techo y su profundidad en relación a las ventanas.

Aunque siempre es muy complejo el comportamiento de los flujos de aire en el interior de los edificios, los patrones de distribución y direcciones de los flujos de aire en este objeto de

estudio se comportan, por lo general, dentro del esperado cuando se analiza el posicionamiento de las ventanas existentes en relación al los vientos predominantes y la compartimentación interna del edificio. El análisis CFD sirvió para confirmar la teoría y dejar mucho más claros el comportamiento de los flujos del aire en este edificio.

TEMPERATURAS OPERATIVAS

En las imágenes a continuación se puede ver al mismo tiempo las temperaturas operativas interiores y su distribución en todos los ambientes en este mismo momento escogido.

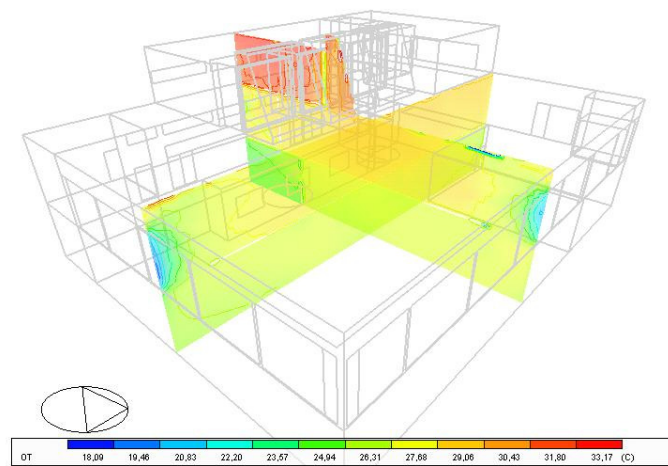


Figura 5.42: Secciones longitudinal y transversal.

Fuente: El autor.

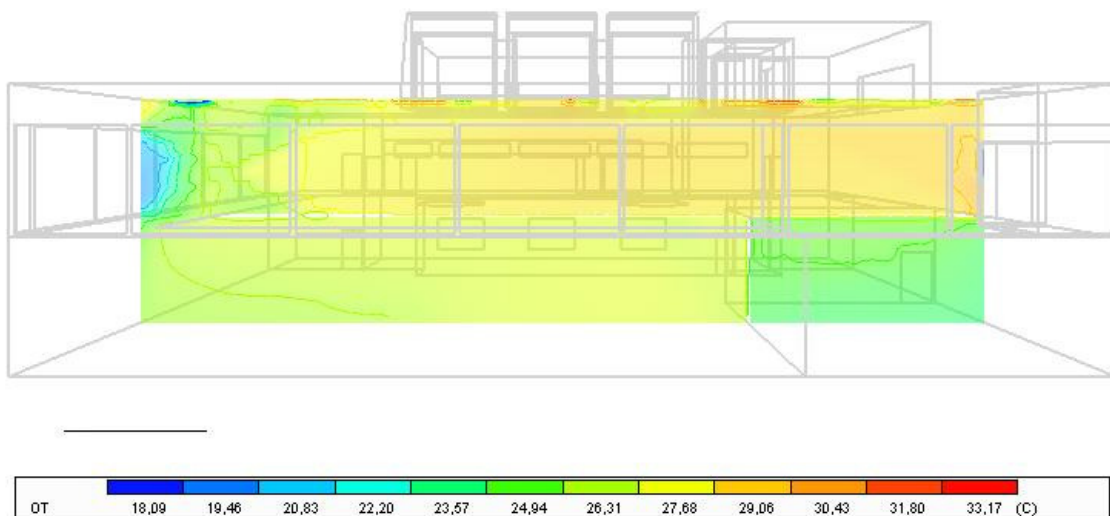


Figura 5.43: Temperaturas operativas. Sección longitudinal.

Fuente: El autor.

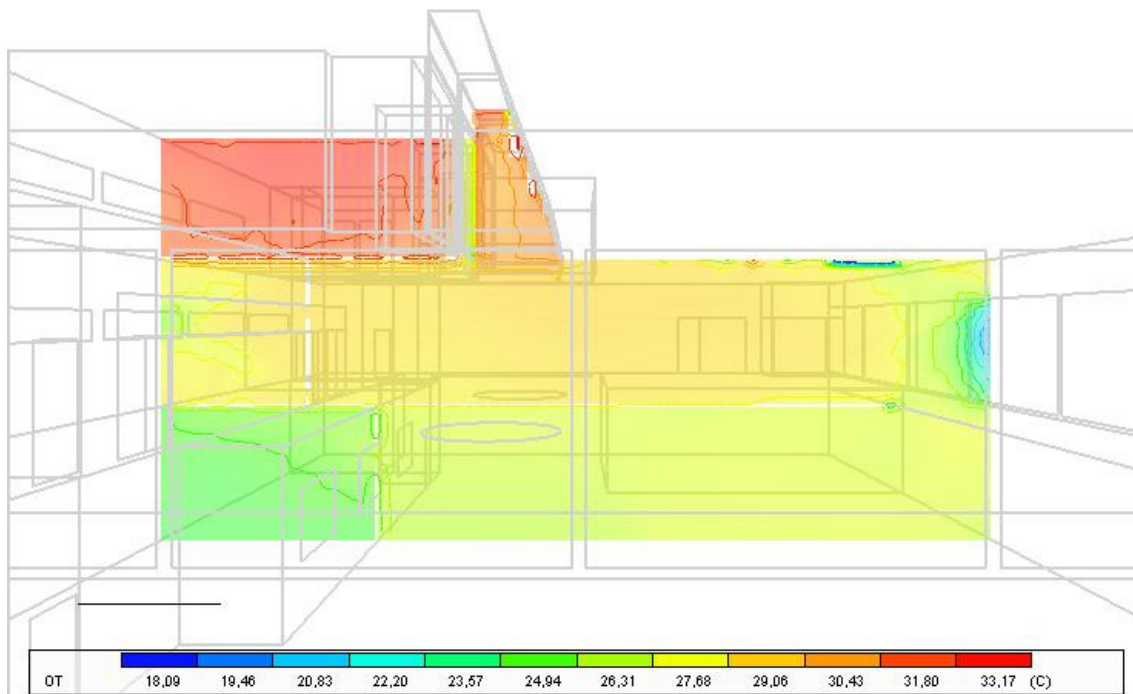


Figura 5.44: Temperaturas operativas. Sección transversal.

Fuente: El autor.

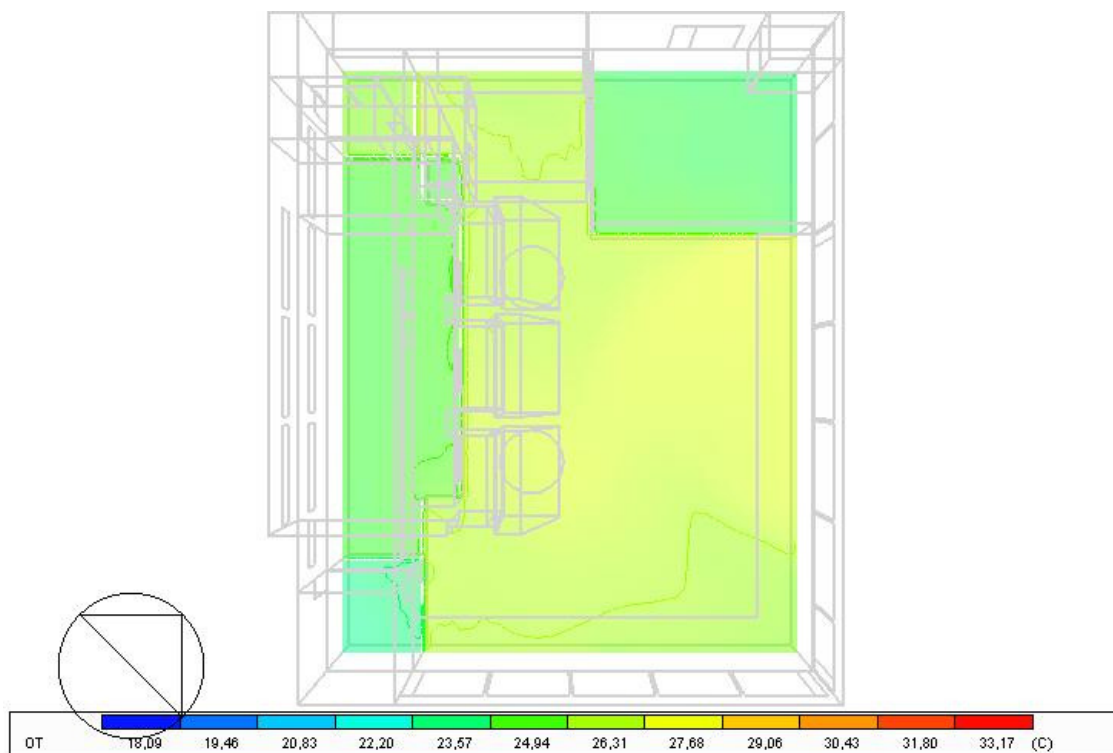


Figura 5.45: Temperaturas operativas en la planta sótano.

Fuente: El autor.

En las imágenes anteriores se puede observar que en la planta sótano es donde se dan las temperaturas operativas más bajas. Esto se debe al hecho de que, por estar esta planta enterrada, no recibe las radiaciones solares que incrementan las ganancias de calor en los otros niveles, y también sus paredes límites están en contacto directo con la tierra que esta a temperaturas siempre más bajas que las exteriores durante los días de verano. Además, al no tener ventanas, el aire más frío de la planta baja descende por los huecos en la losa y se concentra en la planta sótano.

Se observa también en este nivel que en los espacios donde no hay normalmente personas y generación de calor, las temperaturas se encuentran más bajas, como por ejemplo la escalera de incendio y en los almacenes. En estos últimos, las temperaturas operativas medias están entorno de los 23,57°C en esta hora analizada. En el gran espacio de lectura, donde hay el público general y ordenadores, se ve temperaturas mayores, entorno de los 26,31°C.

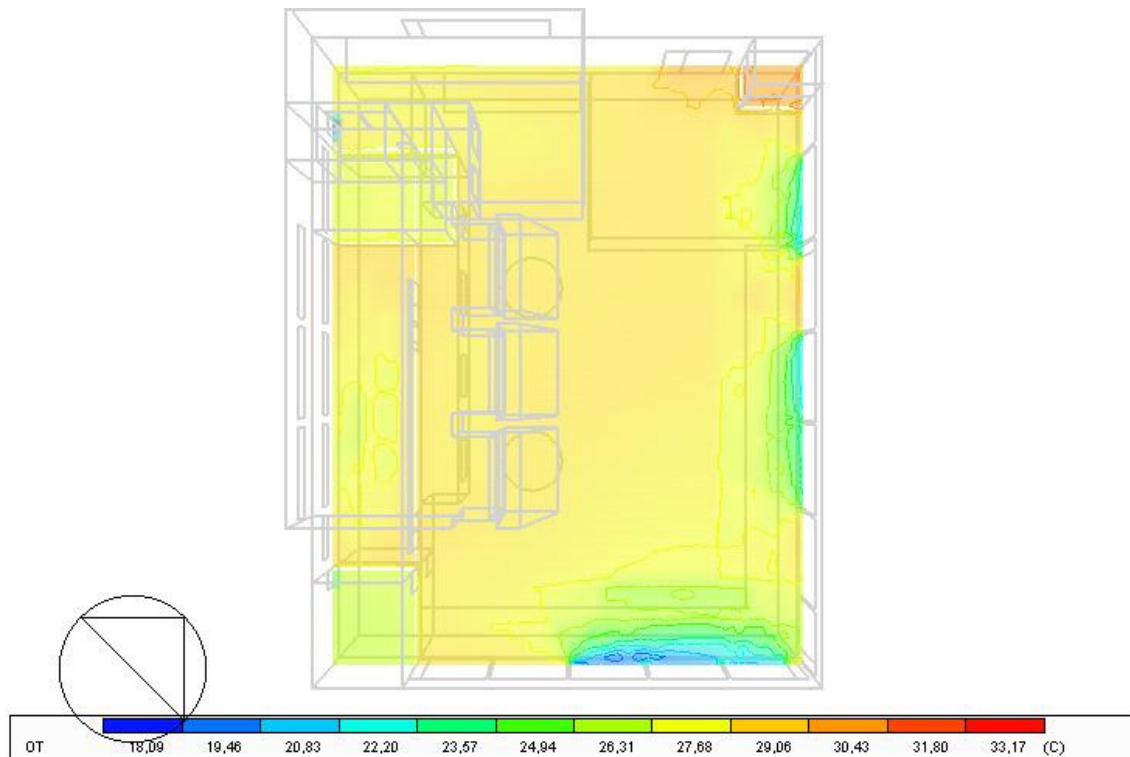


Figura 5.46: Temperaturas operativas en la planta baja.

Fuente: El autor.

En la planta baja de la biblioteca, se observa una distribución de temperaturas más homogénea. Se ve sólo temperaturas un poco más bajas cerca de algunas ventanas de la fachada Sur y Este en el espacio de lectura, por donde el aire interior está saliendo probablemente succionado por las presiones negativas externas creadas por el viento. En

este nivel hay la mayoría de las ventanas del edificio y el aire distribuye mejor las temperaturas por todo el espacio ventilado naturalmente. La planta baja recibe las ganancias solares en ciertos horarios y ya se percibe el aumento de las temperaturas en comparación con la planta sótano. Las temperaturas operativas están en media entre los 27,67°C y los 29,06°C.

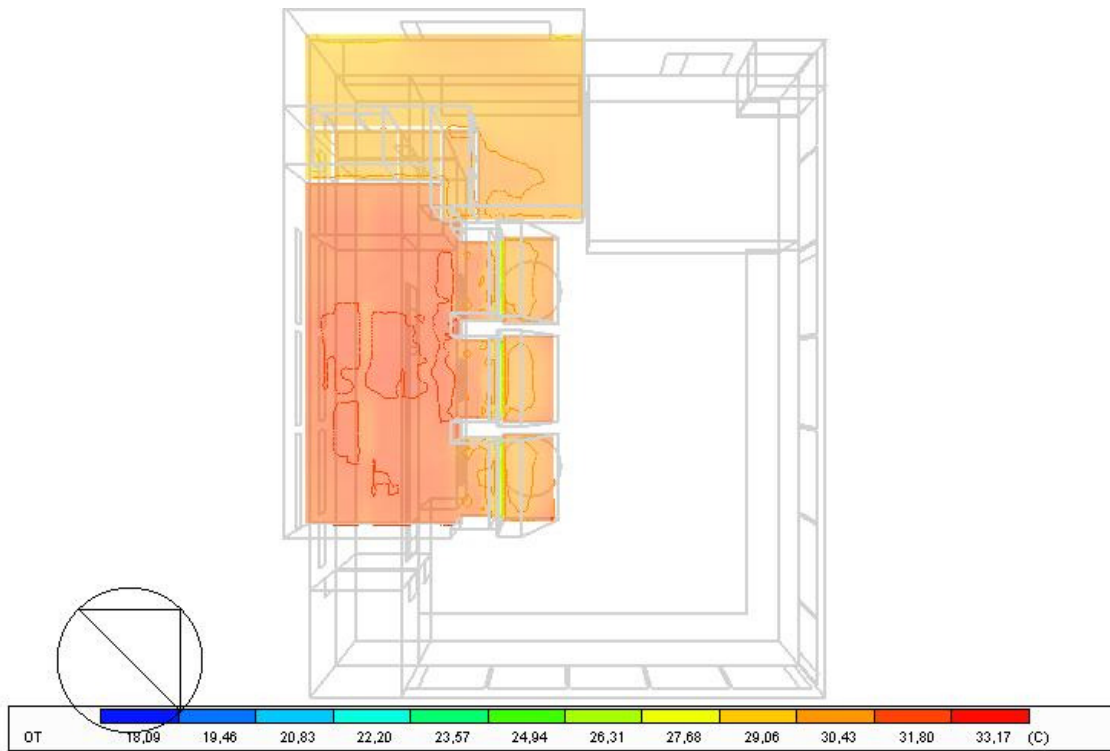


Figura 5.47: Temperaturas operativas en la planta primera.

Fuente: El autor.

En la planta primera es donde se observan las temperaturas más altas. Esto se debe al gran periodo del día que este nivel recibe las radiaciones de sol directamente, ya que es la planta de cobertura del edificio. Otro factor que favorece este aumento de temperatura es la baja cantidad de ventilación que este nivel recibe, ya que depende prácticamente sólo la ventilación unilateral. En este día muy cálido de verano, en la sala de maquinas las temperaturas llegaron a los valores más altos del edificio, entre los 31,80°C a los 33,17°C. En el espacio de lectura y en las cabinas de estudio individual, las temperaturas operativas marcaron entre los 29,06°C y los 30,43°C.

ANÁLISIS DEL CONFORT

Para analizar el confort de los ocupantes de este edificio que está simulado con estrategias de ventilación natural, es necesario utilizar un nuevo modelo de confort adaptativo de Brager y de Dear [49] que contempla finalmente los edificios ventilados naturalmente. En la Figura 5.48 podemos ver el modelo de Confort Adaptativo del Estándar ASHRAE 55 que utilizaremos para evaluar el confort en este caso de estudio, pues la biblioteca atiende a los parámetros necesarios de actividad con tasa metabólica de hasta 1.2 Met y los ocupantes pueden escoger su vestimenta.

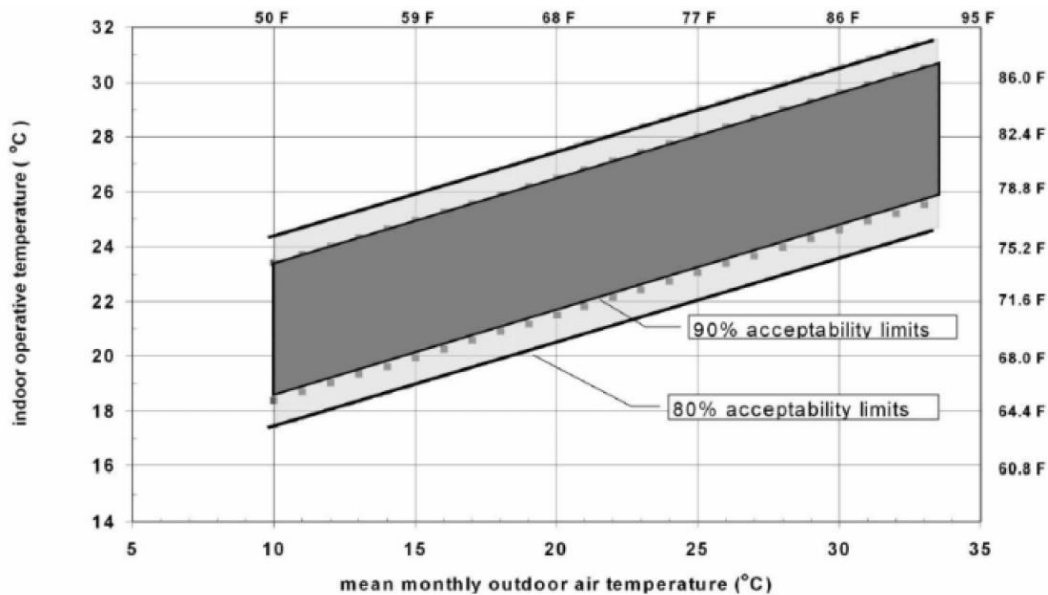


Figura 5.48: Estándar de Confort Adaptativo ASHRAE 55.

Fuente: BRAGER y DE DEAR, 2001 [49].

En el horario analizado en esta simulación, la temperatura externa es de 30°C. Según este modelo, las temperaturas operativas internas aceptables para 90% de las personas serían de entre 25 y 29°C. Si se consideran 80% de personas satisfechas, estos límites aumentan hasta valores entre un poco menos de 24 y un poco más de 30°C. Es importante resaltar que esta es la peor situación posible para este caso estudiado, donde fue simulando el día con las temperaturas medias más cálidas del verano en los meses en que la biblioteca está funcionando.

Podemos ver que las temperaturas más altas encontradas en el edificio (sin considerar la sala de máquinas que no es habitada) fueron de 30,43°C en los espacios de la planta primera. Estos valores serían satisfactorios para 80% de las personas. En la planta baja, con

temperaturas operativas entre 27,67°C y los 29,06°C agradaaría entorno al 90% de los ocupantes. En la planta sótano, algunas personas que tuviesen que entrar a los almacenes o a la escalera de incendio, podrían estar en disconfort por sentir frío a temperaturas de 23,57°C, poco abajo del límite aceptable para 80%. En el grande espacio de lectura en este nivel, 90% de las personas estarían confortables a las temperaturas operativas de 26,31°C.

La Figura 5.49 muestra nuevamente los resultados de la situación escogida S-3.2 para toda la semana del día 22 al día 28 de julio de 2002, ahora con los valores de humedad relativa del aire interior. Se puede observar que los niveles de humedad relativa del aire durante el horario de funcionamiento de la Biblioteca se mantienen en media entorno al 70% pasando un poco en algunos días por la tarde, y registrando los valores más altos por las noches que pasan al 80%. Valores de humedad relativa entre 30 y 70% son considerados satisfactorios para los padrones de confort, con una tolerancia máxima hasta los 90%. Por eso, los resultados observados no afectarían el confort del edificio.

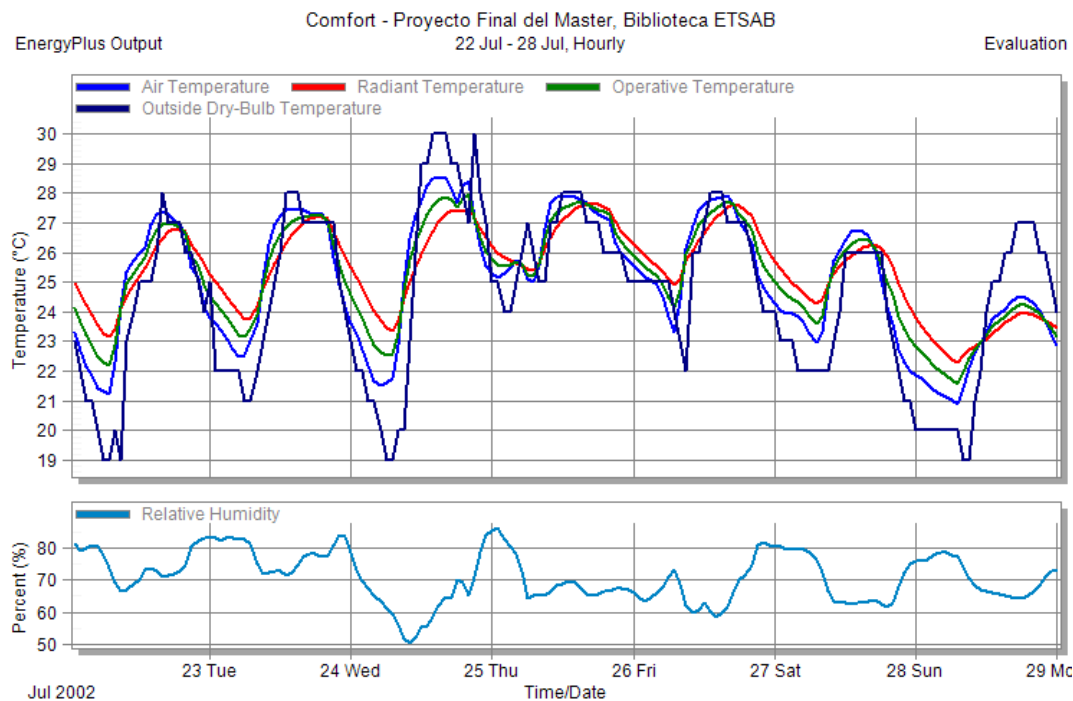


Figura 5.49: Resultados de confort de la simulación S-3.2.

Fuente: El autor.

Por eso, basado estos datos y en el Estándar de Confort Adaptativo, podemos decir que el edificio con más aberturas operables que las actuales y con las lamas del proyecto original en las fachadas Sur y Este, podría proporcionar confort a sus usuarios durante el verano solo funcionando con estrategias de ventilación natural, sin la necesidad de climatización.

Modelo de Fanger

Entre los datos de salida de la simulación CFD, el programa permite la visualización del confort según el modelo de Fanger. A continuación podemos ver las grandes discrepancias en los resultados de este método con del modelo del Confort Adaptativo. En las imágenes se ve la Porcentaje de Personas Descontentas (PPD) con las temperaturas internas, según el modelo de Fanger.

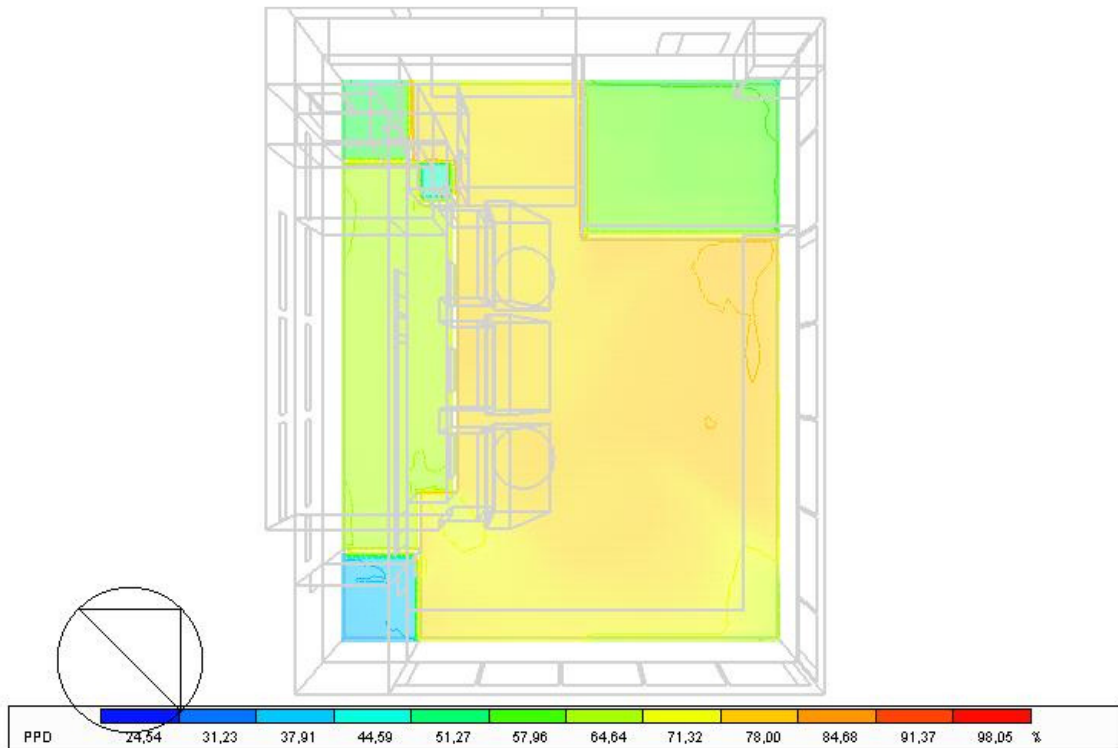


Figura 5.50: PPD en la planta sótano.

Fuente: El autor.

En la planta sótano (Figura 5.50), donde se encuentran las temperaturas más bajas, la porcentaje de personas no satisfechas en el espacio de lectura sería entorno de 78%. En la Figura 5.51 se puede ver que en la planta baja las temperaturas operativas interiores del gran espacio de lectura no sería agradables para cerca de 85% de las persona. Este índice baja un poco en las oficinas, donde entre 71 a 65% de las personas no estarían satisfechas. En la Figura 5.52 a continuación se puede observar que en la planta primera, según el modelo de Fanger, casi 98% de las personas en media estarían descontentas con las condiciones internas.

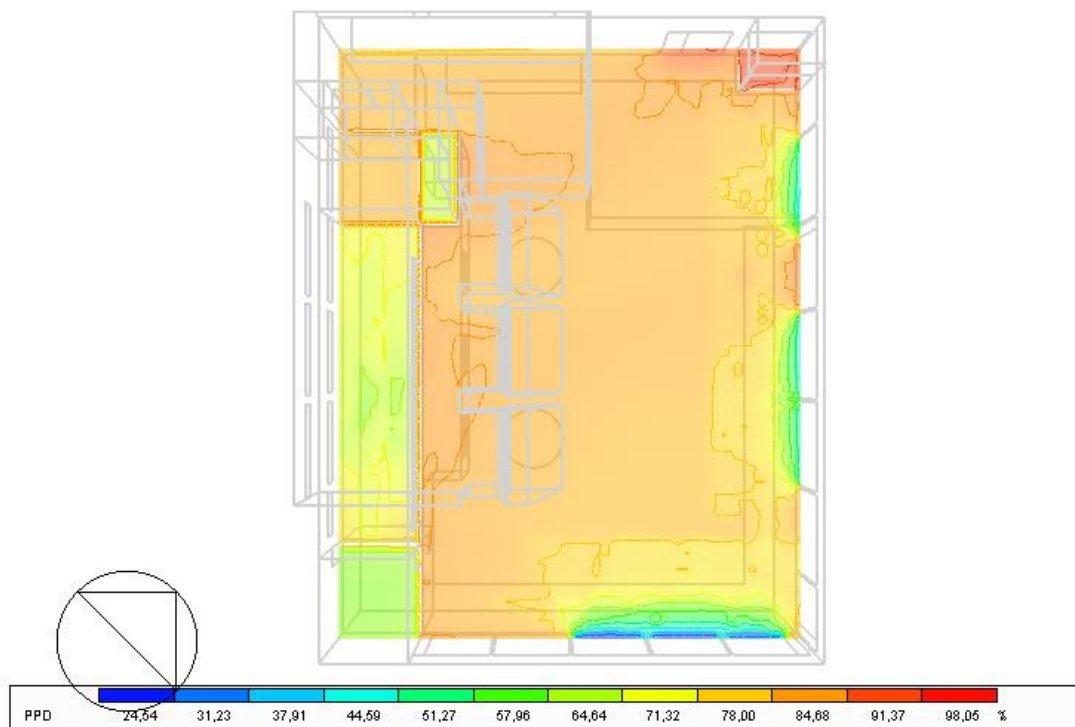


Figura 5.51: PPD en la planta baja.

Fuente: El autor.

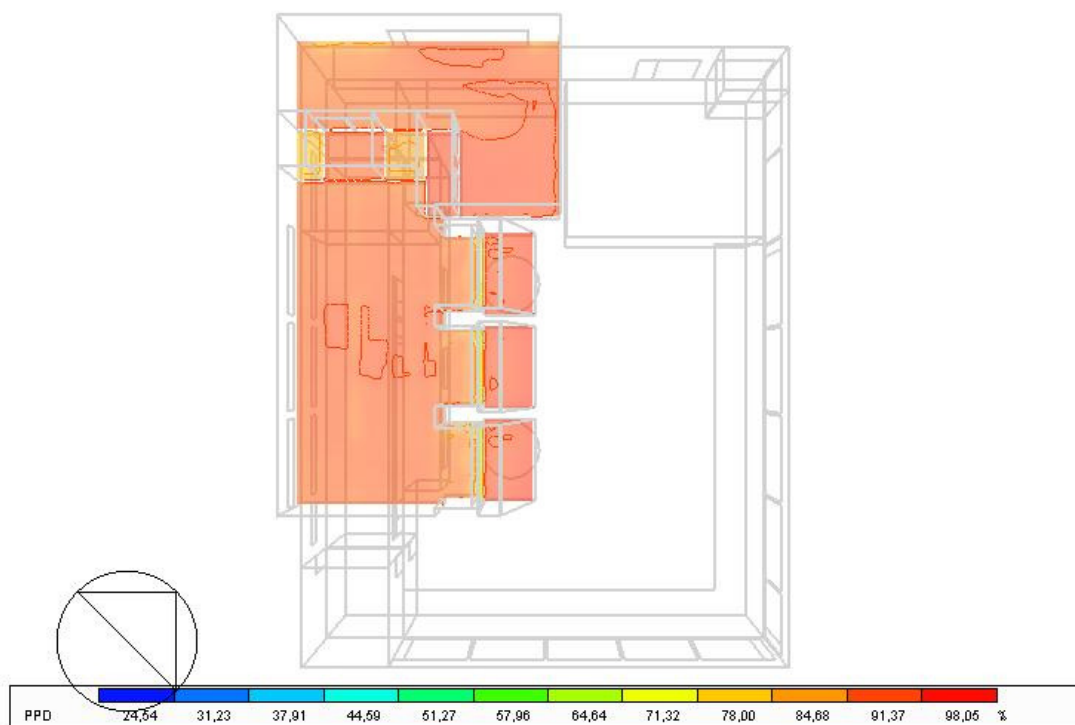


Figura 5.52: PPD en la planta primera.

Fuente: El autor.

Es posible concluir que para el modelo de Fanger, estos resultados no serían viables para proporcionar confort. Por eso, muchos estudios sobre el confort adaptativo van en contra de este modelo [48]. Este método prácticamente descarta la utilización de la ventilación natural en muchas regiones climáticas del mundo pues tiene patrones muy rígidos de confort. Es importante recordar que el método de Fanger fue concebido en 1972 para espacios bajo la condición de estado estacionario, o sea, con temperatura constante [4].

Por eso, no debería ser aplicado a edificios que funcionan con la ventilación natural, donde la temperatura interna no es constante. Como ya se ha comentado en este trabajo, el hecho de estar en espacios ventilados naturalmente crea en los ocupantes menos expectativas en cuanto a niveles rígidos de temperatura, haciendo con que toleren mejor las variaciones y intenten adaptarse a las nuevas condiciones, teniendo acciones como abrir más o cerrar la ventana, sacar o poner un jersey, cambiar su ubicación a un sitio más cerca o más lejos de la ventana, etc.

5.7. SIMULACIÓN CON OTROS ENTORNOS CLIMÁTICOS

En esta parte final del trabajo, se intentó investigar las diferencias entre la eficiencia de las estrategias de ventilación natural analizadas para este caso de estudio en Barcelona, con la eficiencia de este mismo caso en de otras regiones climáticas del mundo. Para estas comparaciones se hará un análisis simple de la misma situación S-3.2 en otros dos entornos climáticos: el ecuatorial de Belém y en el templado de São Paulo, ambos en Brasil.

5.7.1. Simulación con entorno climático de Belém

La ciudad de Belém está ubicada en la región amazónica del Brasil y tiene un clima cálido y húmedo, con alta pluviosidad (2.834 mm), humedad alta (media anual de 86%), y con poca variación entre las temperaturas diurna y nocturna. La temperatura media es de 25°C en febrero y 31°C en julio. En el hemisferio Sur, el verano ocurre entre los meses de octubre a marzo, sin embargo, la proximidad de la ciudad con la línea del ecuador hace que los meses más calientes sean diferentes. En Belém las temperaturas más altas están en media en el “periodo seco” de la Amazonia, cuando la humedad relativa y las lluvias son un poco menores (de junio a noviembre).

A continuación, en la Figura 5.53 se puede ver el resultado de la simulación en la semana más cálida en el clima de Belém, para la misma situación escogida como la mejor en el edificio estudiado en este trabajo (S-3.2). Aunque julio suele tener los días más cálidos del

año, la semana con las temperaturas más altas registradas en el año de cálculo del programa fue la del día 28 al día 3 de mayo.

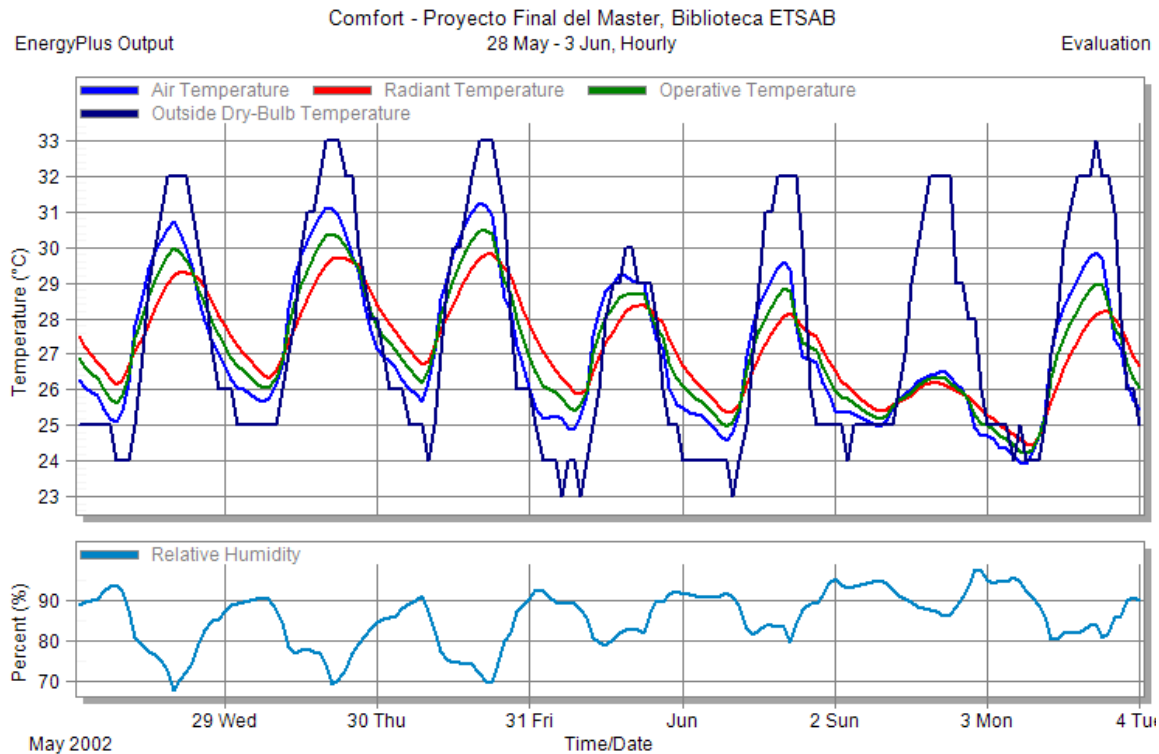


Figura 5.53: Resultados de confort de la simulación S-Bel.

Fuente: El autor.

Una vez más, utilizaremos como referencia de confort el modelo de confort Adaptativo. Para los peores casos, del día 29 y 30 de mayo, con la temperatura externa entorno de los 33°C, las temperaturas aceptables para 90% de las personas serían entre 26°C y un poco más de 30°C, y para el 80% la franja entre los 25°C y un poco más de 31°C. Analizando el edificio como un todo, prácticamente 90% de las personas aceptarían las temperaturas interiores en la peor situación posible, cuando llegaron en media a los 30,5°C.

Sin embargo, los valores de humedad relativa del aire en esta semana, durante el horario de funcionamiento del edificio, están siempre por encima de los 70% y a veces próximos de los 90%. Son valores considerados fuera del rango satisfactorio, pero aún dentro del límite máximo tolerable. Considerando que mayo todavía está entre los meses más húmedos de la Amazonia, podríamos decir que las estrategias de ventilación natural serían más eficaces entre los meses de junio a noviembre en la ciudad de Belém.

5.7.2. Simulación con entorno climático de São Paulo

El clima de São Paulo es considerado subtropical, con una temperatura media anual de 19,25 grados Celsius, con inviernos templados y veranos con temperaturas moderadamente altas, aumentadas por el efecto de la altísima concentración de edificios. El mes más caliente, febrero, tiene una temperatura media de 22,5 °C y el mes más frío, julio, de 16 °C.

Por estar cerca del mar, los vientos venidos de la costa son una constante en el clima local, siendo responsables de evitar días de calor intenso en el verano o de frío en el invierno; además los vientos oceánicos dejan el aire más húmedo en la capital del Estado. La humedad tiene índices relativamente aceptables durante todo el año, sin embargo el aire es llevado a niveles críticos en el invierno por causa del fenómeno de la inversión térmica y por la menor precipitación de lluvias de mayo a septiembre, periodo frío y seco.

A continuación, podemos observar el resultado de la simulación S-3.2 en el entorno climático de São Paulo.

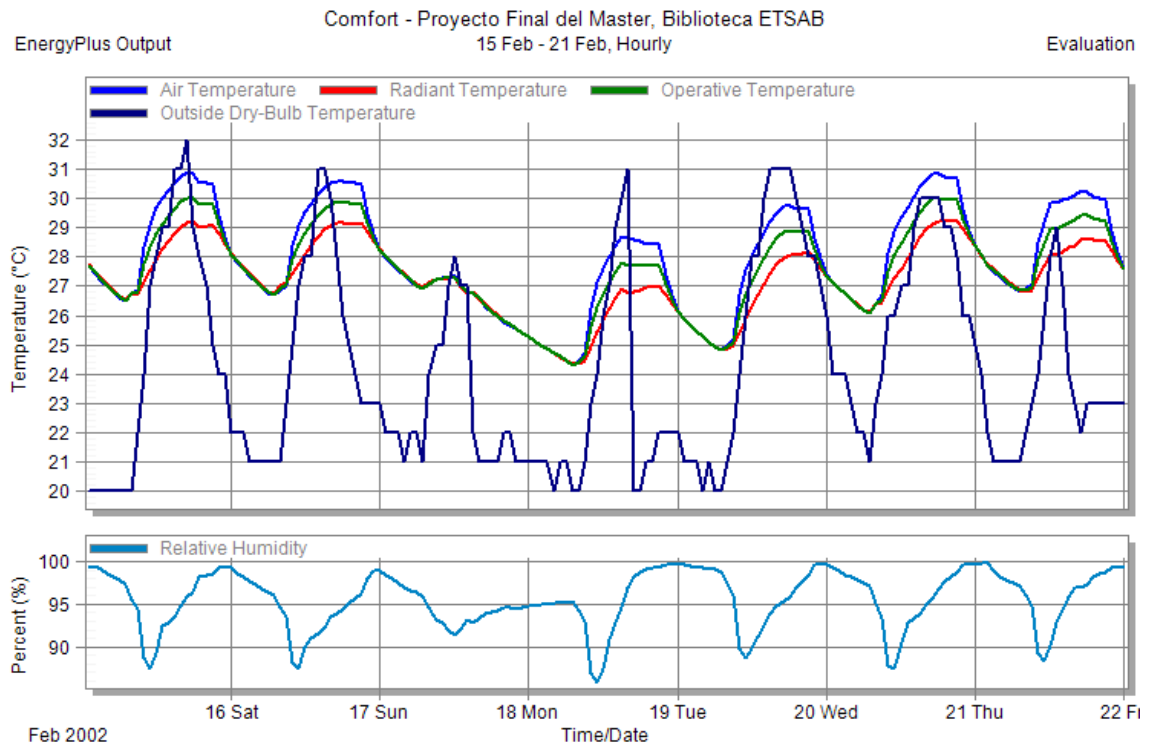


Figura 5.53: Resultados de confort de la simulación S-SP.

Fuente: El autor.

La ciudad de São Paulo incluso en el verano no suele ser más húmeda que Belém, sin embargo en esta semana analizada, seguramente muy lluviosa, la humedad relativa llegaron

a valores bien altos, casi siempre por encima de los 90% durante el funcionamiento del edificio. Nuevamente, las estrategias de ventilación natural estarían limitadas por la alta humedad relativa del clima tropical brasileño.

En relación a las temperaturas registradas, el peor caso sería del viernes, 15 de febrero, con la temperatura externa con un pico de 32°C. Para este valor, según el modelo de Brager y de Dear [49], las temperaturas operativas interiores entre 25 y 30°C serían aceptables para 90% de los ocupantes. Con esto, la temperatura operativa media en el interior del edificio de 30°C estaría dentro de estos límites.

5.7.3. Comentarios Generales

Es interesante ver qué mismo un edificio que fue proyectado para otro lugar de clima muy distinto, obtuvo resultados satisfactorios para proporcionar confort para estas dos ciudades del Brasil. Las limitaciones de la utilización de la ventilación natural fueron debido a los niveles de humedad relativa por encima del rango considerado satisfactorio para el confort.

Sin embargo, la ventilación natural es la mejor estrategia pasiva para lugares de humedad relativa alta. Para estos climas estudiados, necesitaría de velocidades del aire más altas para conseguir reducir el desconfort creado por las altas humedades registradas en las simulaciones.

El importante en estas comparaciones, fue percibir el potencial de las estrategias de ventilación natural para los diferentes climas del mundo. Esto demuestra el importante efecto de la ventilación natural en ayudar a bajar las temperaturas interiores y conseguir evitar el uso desnecesario de climatización.

6. CONCLUSIONES

En el inicio de esta investigación, se dijo que para la ventilación natural tenga el máximo de eficiencia en un edificio, es necesario que sea planeada desde las etapas iniciales del diseño y no esperar que ella simplemente suceda y sea eficaz después que el edificio esté construido, pues hay casos en que esto se vuelve realmente inviable. Sin embargo, no fue lo que sucedió en este caso de estudio.

El edificio objeto de este estudio, aunque no fue planificado para funcionar bajo la ventilación natural puede ser adaptado a esta tecnología pasiva y llegar a resultados muy satisfactorios. Fue posible comprobar que con tan sola la ventilación natural ya sería suficiente para proporcionar confort a los ocupantes del edificio mediante alteraciones en las carpinterías existentes y sin alterar significativamente el proyecto original de la Biblioteca. Sobre todo, si se mantuvieron las soluciones iniciales del proyecto, como las lamas que al final no fueron ejecutados.

El uso de la ventilación natural en el edificio mejoraría mucho su eficiencia energética, pues suprimiría el uso de la climatización existente. Con esto, el edificio reduciría en más de 28.500KWh de energía al año. Esto representa una reducción de casi 20 mil Kg de emisiones de CO₂ en la atmosfera al año. Además de los grandes beneficios económicos del uso de la ventilación natural, se obtendrían importantes beneficios medioambientales. Esto sin hablar de la mejorar en la calidad del aire interior y del bienestar que la ventilación natural proporciona.

Fue posible ver en este trabajo también el gran potencial de la ventilación nocturna para la ciudad de Barcelona. Aunque la variación térmica media diaria en el verano ideal para la ventilación nocturna sea igual o mayor que 10°C Barcelona, con una media de 9°C en este periodo consiguió resultados bien significativos. Esta estrategia de ventilación natural presento buenos resultados tanto en conjunto con la ventilación de confort, como en conjunto a la climatización. En esta última opción, la ventilación nocturna podría reducir el consumo del edificio estudiado en hasta 11.000KW al año. Incluso aplicándola en la biblioteca como está hoy construida, ya conseguiría una reducción entorno de 9.000KWh de energía al año, que representa evitar la emisión de más de 6 mil Kg de CO₂ al año.

No obstante, el edificio analizado presenta limitaciones a la ventilación natural que son intrínsecas a su uso, como baja tolerancia a ruidos y mayor necesidad de seguridad para proteger la colección de libros de la biblioteca. Estas cuestiones tienen soluciones como ya

mencionado el trabajo, pero tendrían que ser analizadas con cuidado a esto caso antes de si intentar implantar las estrategias de ventilación natural estudiadas.

Es necesario también mencionar las limitaciones sobre los resultados de los programas de simulación energética como el EnergyPlus. Aunque ellos utilizan los datos reales de la ciudad para hacer las simulaciones, estos datos suelen ser tomados en las estaciones meteorológicas en los aeropuertos o en centros muchas veces distantes de la ubicación real del edificio estudiado. Los datos de velocidades del viento utilizados en el programa, por ejemplo, son mayores que los reales medidos in situ.

Nuestras mediciones sirvieron para comprobar estas diferencias, pero fueron insuficientes para alimentar las bases de datos del programa para posibilitar la realización de los cálculos. Para esto sería necesario mucho más tiempo y equipamientos que esta investigación podría disponer.

Sin embargo, esto no invalida los resultados obtenidos que, aunque pueden no ser exactos están muy próximo de los reales en las condiciones simuladas. Además, aunque en algunos momentos del día, la ventilación natural puede no ser suficiente para mantener los niveles ideales de confort, fue posible ver en este trabajo que esto puede ocurrir también con los caros sistemas de climatización. Toda tecnología está sujeta a fallos y esto incluye las estrategias de ventilación natural y los sistemas de aire acondicionado.

Las simulaciones computacionales, aunque con estas limitaciones, son una importante herramienta de auxilio a los proyectistas, pues permiten probar muchas soluciones y dejarlos más seguros del éxito de las medidas adoptadas en momento del diseño, principalmente en un asunto complejo como la ventilación natural. Aunque la preparación y desarrollo de una simulación lleva su tiempo, los resultados son primordiales para mejorar la eficiencia energética de los edificios. El CFD por su vez, si bien más complejo, completa los análisis energéticos y permite una clara visualización de las temperaturas en el interior del edificio y de los flujos de aire, tornándose así en una poderosa herramienta didáctica y de investigación.

Por fin, podemos concluir que la ventilación natural si bien es más difícil de controlar, tiene ventajas que hacen valer todo esfuerzo para utilizarla. Sus estrategias son bien diversificadas y pueden ser aplicadas no sólo para el clima de Barcelona, como también para muchos lugares del mundo con climas bien distintos. La ventilación natural es una de las mejores herramientas sostenibles para mejorar la eficiencia energética de los edificios.

RECOMENDACIONES

Esta investigación da origen a nuevas indagaciones que podrían ser objeto de estudio de futuros trabajos sobre este tema, como por ejemplo:

- Hacer más mediciones in situ para comparar con los datos simulados;
- Evaluar la influencia del número, localización, posición y tamaño de las aberturas simuladas;
- Analizar las tasas de renovaciones de aire en cada ambiente bajo la ventilación natural;
- Investigar los mejores horarios para la utilización de la ventilación nocturna en la ciudad de Barcelona.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] GHIAUS, C. and ALLARD, F., 2005. *Natural ventilation in the urban environment: assessment and design*. London: Earthscan.
- [2] CORBELLÀ, O. and YANNAS, S., 2003. *Em busca de uma arquitetura sustentável para os trópicos. Conforto Ambiental*. Rio de Janeiro: Revan.
- [3] YARKE, E., 2005. *Ventilación natural en edificios: fundamentos y métodos de cálculo para aplicación de ingenieros y arquitectos*. Buenos Aires: Nobuko.
- [4] SANTAMOURIS, M. and WOUTERS, P., 2006. *Building ventilation: the state of the art*. London: Earthscan.
- [5] ASOCIACIÓN DE FABRICANTES DE EQUIPOS DE CLIMATIZACIÓN and ATECYR, 1999. *Impacto ambiental de la climatización: plan de calidad*. Madrid: AFEC, Asociación de Fabricantes de Equipos de Climatización.
- [6] ZABALZA BRIBIÁN, I., 2007. *El Ahorro energético en el nuevo código técnico de la edificación*. Madrid: Fundación Confemetal.
- [7] EDWARDS, B., 2008. *Guía básica de la sostenibilidad*. 2a rev y ampl edn. Barcelona etc.: Gustavo Gili.
- [8] BEYOND PETROLEUM., 2010. *BP Statistical Review of World Energy June 2010*. London.
- [9] UNITED NATION STATISTICS DIVISION., 2009. *ENVIRONMENTAL INDICATORS: Greenhouse Gas Emissions*.
- [10] USÓN GUARDIOLA, E., 2004. *Dimensiones de la sostenibilidad*. Barcelona: Edicions UPC.
- [11] MONROY, M., 1996. *Manuales de diseño ICARO. Calidad Ambiental en la Edificación para Las Palmas de Gran Canaria*. Islas Canarias
- [12] INTERNATIONAL ENERGY AGENCY., 2009. *World Energy Outlook 2009. Resumen ejecutivo*. Paris: IEA: International Energy Agency.
- [13] ROULET, C., 2008. *Ventilation and airflow in buildings: methods for diagnosis and evaluation*. London: Earthscan.
- [14] EDWARDS, R., 2005. *Handbook of domestic ventilation*. Oxford, etc.: Elsevier Butterworth-Heinemann.

- [15] AWBI, H.B., 2003. *Ventilation of buildings*. 2 edn. London etc.: Spon.
- [16] VALDES, O. 1999. *Ventilación de los edificios. Un enfoque integrador y energético*. Cuba. Dirección de Proyectos Ministerio de la Construcción.
- [17] GIVONI, B., 1992. Comfort, climate analysis and building design guidelines. *Energy and Buildings*, **18**(1), 11-23.
- [18] EMMERICH, S., et al., 2001. *Natural Ventilation Review and Plan for Design and Analysis Tools*. NIST: National Institute of Standards and Technology. Boulder, Colorado. U.S. Department of Commerce.
- [19] GRATIA, E., BRUYÈRE, I. and DE HERDE, A., 2004. *How to use natural ventilation to cool narrow office buildings*. *Building and Environment*, **39**(10), 1157-1170.
- [20] OLGAY, V., 1963. *Design with climate. Bioclimatic approach to architectural regionalism: Some chapters based on cooperative research with Aladar Olgyay*.
- [21] THOMAS, L., MARINO, B. and LINDEN, P., 2006. *Ventilación natural de dos habitaciones: modelado en el laboratorio y resultados experimentales*.
- [22] MATOS, M., 2007. *Simulação computacional de desempenho térmico de residências em Florianópolis utilizando a ventilação natural*. Florianópolis. Brasil.
- [23] ASHRAE. 2001. ASHRAE Handbook – Fundamentals.
- [24] EMMERICH, S., et al., 2003. *Impact of Natural Ventilation Strategies and Design Issues for California Applications, Including Input to ASHRAE Standard 62 and California Title 24*. NIST: National Institute of Standards and Technology. Boulder, Colorado. U.S. Department of Commerce.
- [25] HAUSLADEN, G., 2005. *Climate design: solutions for buildings that can do more with less technology*. Basel: Birkhäuser.
- [26] LEVERMORE, G.J., 2000. *Building energy management systems :applications to low-energy HVAC and natural ventilation control*. 2 edn. London etc.: E & FN Spon.
- [27] CIBSE (1997) Application Manual AM10. *Natural ventilation in non-domestic buildings*. London.
- [28] MENDELL, M., FISK, W., DEDDENS, J., SEAVEY, W., SMITH, A. and SMITH, D., 1996. Elevated symptom prevalence associated with ventilation type in office buildings. *Epidemiology*, **7**(6), 583-589.
- [29] FISK, W. and ROSENFELD, A., 1997. Estimates of improved productivity and health from better indoor environments. *Indoor air*, **7**(3), 158-172.

- [30] JIANG, Y., ALEXANDER, D., JENKINS, H., ARTHUR, R. and CHEN, Q., 2003. Natural ventilation in buildings: measurement in a wind tunnel and numerical simulation with large-eddy simulation. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, **91**(3), 331-353.
- [31] ETHERIDGE, D., 2000. Unsteady flow effects due to fluctuating wind pressures in natural ventilation design - instantaneous flow rates. *Building and Environment*, **35**(4), 321-337.
- [32] ETHERIDGE, D., 2000. Unsteady flow effects due to fluctuating wind pressures in natural ventilation design - mean flow rates. *Building and Environment*, **35**(2), 111-133.
- [33] LI, Y., DELSANTE, A., CHEN, Z., SANDBERG, M., ANDERSEN, A. and BJERRE, M., 2001. *Some examples of solution multiplicity in natural ventilation*. Oxford,: Pergamon.
- [34] ZISKIND, G., DUBOVSKY, V. and LETAN, R., 2002. Ventilation by natural convection of a one-story building. *Energy and Buildings*, **34**(1), 91-102.
- [35] ASSIMAKOPOULOS, M., TSANGRASSOULIS, A., MIHALAKAKOU, G., SANTAMOURIS, M. and JAURE, S., 2002. Development of a control algorithm to optimize airflow rates through variable size windows. *Energy and Buildings*, **34**(4), 363-368.
- [36] CARDINALE, N., MICUCCI, M. and RUGGIERO, F., 2003. Analysis of energy saving using natural ventilation in a traditional Italian building. *Energy and Buildings*, **35**(2), 153-159.
- [37] NEVES, L., 2006. *A arquitetura de Severiano Porto sob enfoque bioclimático: ventilação natural no campus de Universidade d Amazonas, Manaus – AM*. Brasil
- [38] PASQUAY, T., 2004. Natural ventilation in high-rise buildings with double facades, saving or waste of energy. *Energy and Buildings*, **36**(4), 381-389.
- [39] OLDHAM, D., DE SALIS, M. and SHARPLES, S., 2004. *Reducing the ingress of urban noise through natural ventilation openings*. Copenhagen: Danish Technical Press.
- [40] LINDEN, P., 1999. The fluid mechanics of natural ventilation. *Annual Review of Fluid Mechanics*, **31**, 201-238.
- [41] ETHERIDGE, D. and SANDBERG, M., 1996. *Building ventilatio: theory and measurement*. Chichester, etc.: John Wiley & Sons.
- [42] PELLETRET, R., ALLARD, F., HAGHIGHAT, F. and VAN DER MASS, J., 1991. *Modelleing of large openings*. Presented at the 21st AIVC Conference, Canada.
- [43] FLOURENTZOU, F., VAN DER MAAS, J. and ROULET, C., 1998. Natural ventilation for passive cooling: measurement of discharge coefficients. *Energy and Buildings*, **27**(3), 283-292.
- [44] AWBI, H.B., 1994. Design considerations for naturally ventilated buildings. *Renewable Energy*, **5**(5-8), 1081-1090.

- [45] BRE, 1994. *Natural ventilation in non-domestic buildings*. BRE Digest, no 339, Building Research Establishment, Garston, UK.
- [46] GONZALO, R. and HABERMANN, K.J., 2006. *Energy-efficient architecture: basics for planning and construction*. Basel etc.: Birkhäuser.
- [47] FIGUEIREDO, C and FROTA, A., 2008. *Ventilação Natural para Conforto Térmico em Edifícios de Escritórios – Avaliação com Modelos Adaptativos*. São Paulo.
- [48] CREMENTS-CROOME, D., 1997. *Naturally ventilated buildings :buildings for the senses, economy and society*. 1 edn. London; New York: E & FN Spon.
- [49] BRAGER, G. and DE DEAR, R., 2001. *Climat, confort & natural ventilation: a new adaptative comfort standard for ASHRAE Standar 55*. Indoor Environmental Quality (IEQ), Center for the Built Environment, Center for Environmental. Design Research, UC Berkeley.
- [50] BRAGER, G. and DE DEAR, R., 2000. *A Standard for Natural Ventilation*. ASHRAE Journal - October 2000. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc.
- [51] GEROS, V., SANTAMOURIS, M., KARATASOU, S., TSANGRASSOULIS, A. and PAPANIKOLAOU, N., 2005. On the cooling potential of night ventilation techniques in the urban environment. *Energy and Buildings*, **37**(3), 243-257.
- [52] KOLOKOTRONI, M. and ARONIS, A., 1999. Cooling-energy reduction in air-conditioned offices by using night ventilation. *Applied Energy*, **63**(4), 241-253.
- [53] PFAFFEROTT, J., HERKEL, S. and WAMBSGANSS, M., 2004. *Design, monitoring and evaluation of a low energy office building with passive cooling by night ventilation*. Lausanne: Elsevier.
- [54] BREESCH, H., BOSSAER, A. and JANSSENS, A., 2005. *Passive cooling in a low-energy office building*. [Phoenix, Ariz.]: Pergamon.
- [55] KOLOKOTRONI, M., GIANNITSARIS, I. and WATKINS, R., 2006. The effect of the London urban heat island on building summer cooling demand and night ventilation strategies. *Solar Energy*, **80**(4), 383-392.
- [56] SHAVIV, E., YEZIORO, A. and CAPELUTO, I., 2001. Thermal mass and night ventilation as passive cooling design strategy. *Renewable Energy*, **24**(3-4), 445-452.
- [57] GEROS, V., SANTAMOURIS, M., TSANGRASOULIS, A. and GUARRACINO, G., 1999. Experimental evaluation of night ventilation phenomena. *Energy and Buildings*, **29**(2), 141-154.
- [58] FINN, D., CONNOLLY, D. and KENNY, P., 2007. Sensitivity analysis of a maritime located night ventilated library building. *Solar Energy*, **81**(6), 697-710.

[59] ARTMANN, N., MANZ, H. and HEISELBERG, P., 2007. Climatic potential for passive cooling of buildings by night-time ventilation in Europe. *Applied Energy*, **84**(2), 187-201.

[60] US DEPARTMENT OF ENERGY (2004b). Getting started with EnergyPlus. LBNL, USA. p. 1-7.

[61] MENDES, N. et al., 2005. *Uso de instrumentos computacionais para análise do desempenho térmico e energético de edificações no Brasil*. Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 5, n. 4, p. 47-68, out./dez. 2005.

[62] RECKZIEGEL, S., MARTINS, D., RAU, S., FERRUGEM, A., SILVA, A., 2009. *Ensaio sobre a utilização da automação de abertura na simulação de desempenho térmico de edificações*. XVIII CIC XI ENPOS I MOSTRA CIENTIFICA.

[63] IBARRA, D. and REINHART, C., 2009. *Building Performance Simulation for Designers – Energy. DesignBuilder // EnergyPlus ‘Tutorial #1’ Getting Started*. Harvard University. Graduate School of Design.

[64] DESIGNBUILDER SOFTWARE. Disponible en: www.designbuilder.com. Acceso en agosto de 2010.

[65] ZHAI, Z. and CHEN, Q., 2004. Numerical determination and treatment of convective heat transfer coefficient in the coupled building energy and CFD simulation. *Building and Environment*, 2004, 39, (8), 1001–1009. 2004. *Fuel and Energy Abstracts*, **45**(6), 440-440.

[66] ZHAI, Z. and CHEN, Q., 2005. Performance of coupled building energy and CFD simulations. *Energy and Buildings*, **37**(4), 333-344.

[67] MUÑOZ, M. 2001. *Análisis del régimen de vientos en el aeropuerto de Barcelona*. NIMBUS, N° 7-8, 2001, PÁGS. 213-231.

[68] SERVEI METEOROLÒGIC DE CATALUNYA, 2010. *Climatologia. El Barcelonès. 1971-200*. Generalitat de Catalunya. Departament de Medi Ambient i Habitatge.

[69] DESIGNBUILDER SOFTWARE. *Manual de ayuda de DesignBuilder en español*. (Versión preliminar 01).

[70] DESIGNBUILDER SOFTWARE. *DesignBuilder Simulation + CFD Training Guide*. DesignBuilder copyright © 2009.

ANEXO I – REPORTAJE FOTOGRÁFICO



Figura A1.1: Fachada Sur.

Fuente: El autor.



Figura A1.2: Acceso principal de la biblioteca.

Fuente: El autor.



Figura A1.3: Fachada Norte. Vista Av. Diagonal.

Fuente: El autor.



Figura A1.4: Fachada Oeste.

Fuente: El autor.



Figura A1.5: Espacio de lectura en la planta baja.

Fuente: El autor.



Figura A1.6: Espacio de lectura en la planta baja.

Fuente: El autor.



Figura A1.7: Espacio de lectura en la planta sótano.

Fuente: El autor.



Figura A1.8: Espacio de lectura en la planta sótano.

Fuente: El autor.



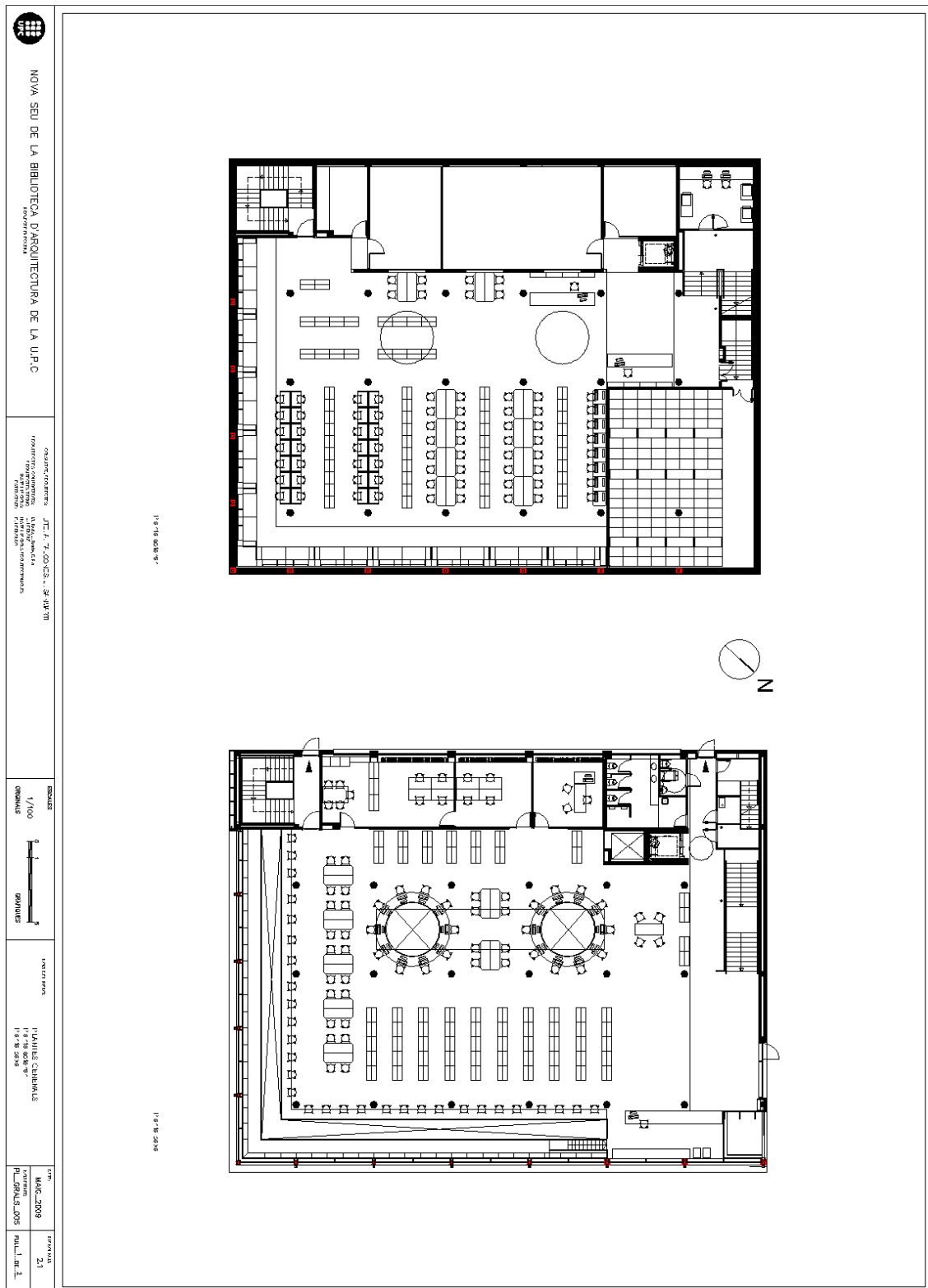
Figura A1.9: Planta primera.

Fuente: El autor.



Figura A1.10: Hueco en la losa de la planta baja.

Fuente: El autor.



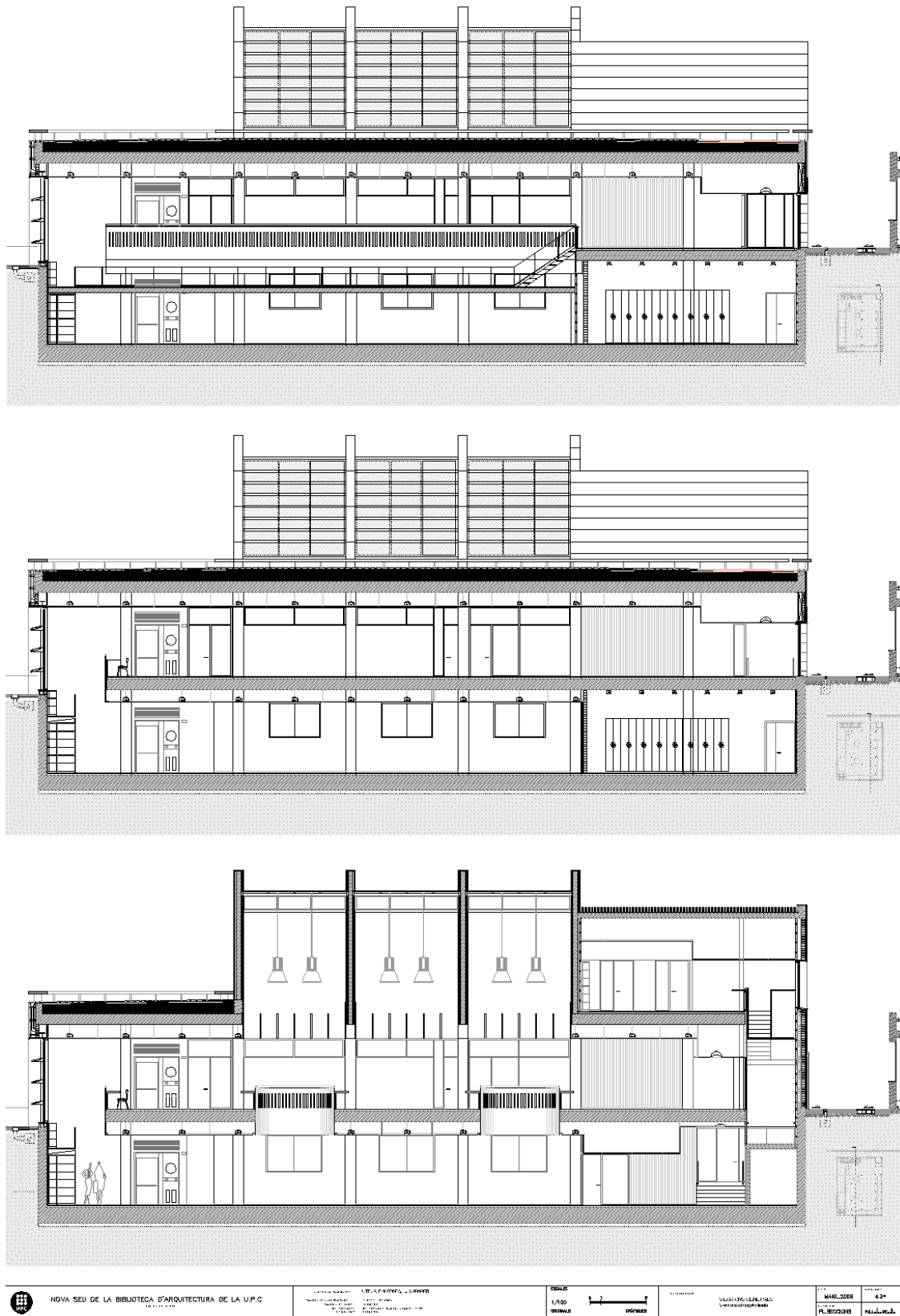


Figura A2.3: Secciones Longitudinales.
Fuente: Universitat Politècnica de Catalunya.

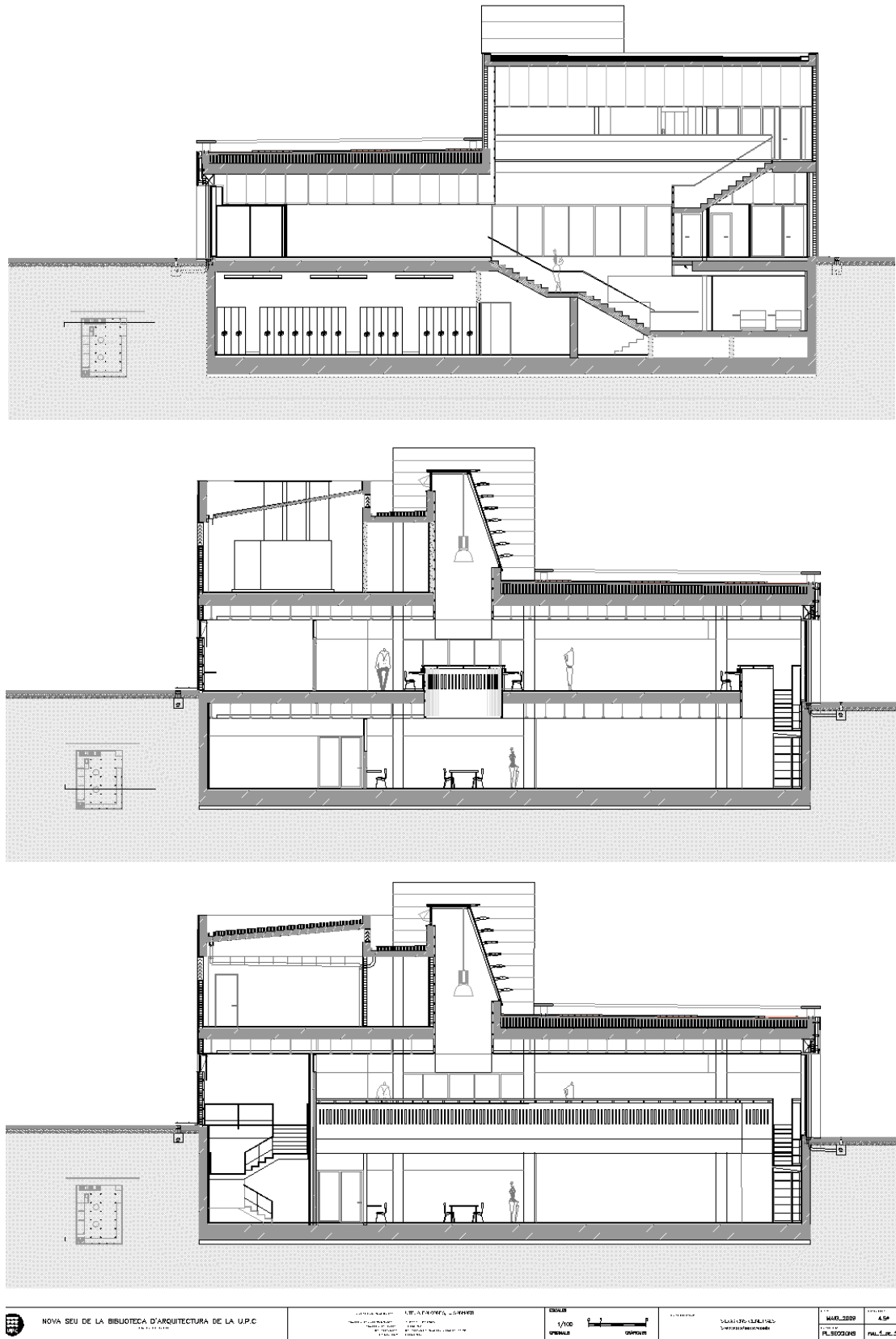


Figura A2.4: Secciones Transversales.
Fuente: Universitat Politècnica de Catalunya.

Fuente: Universitat Politècnica de Catalunya.

ANEXO III – MEDICIONES DE TEMPERATURA Y HUMEDAD

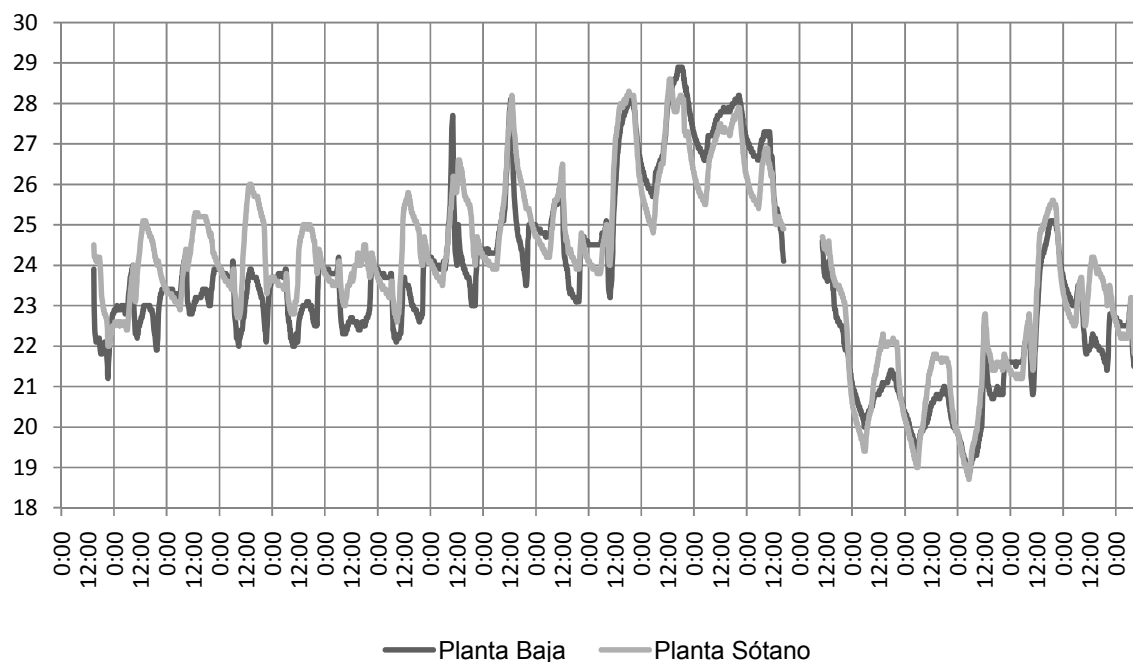


Figura A3.1: Temperatura interiores entre los días 28/05 y 17/06.

Fuente: El autor.

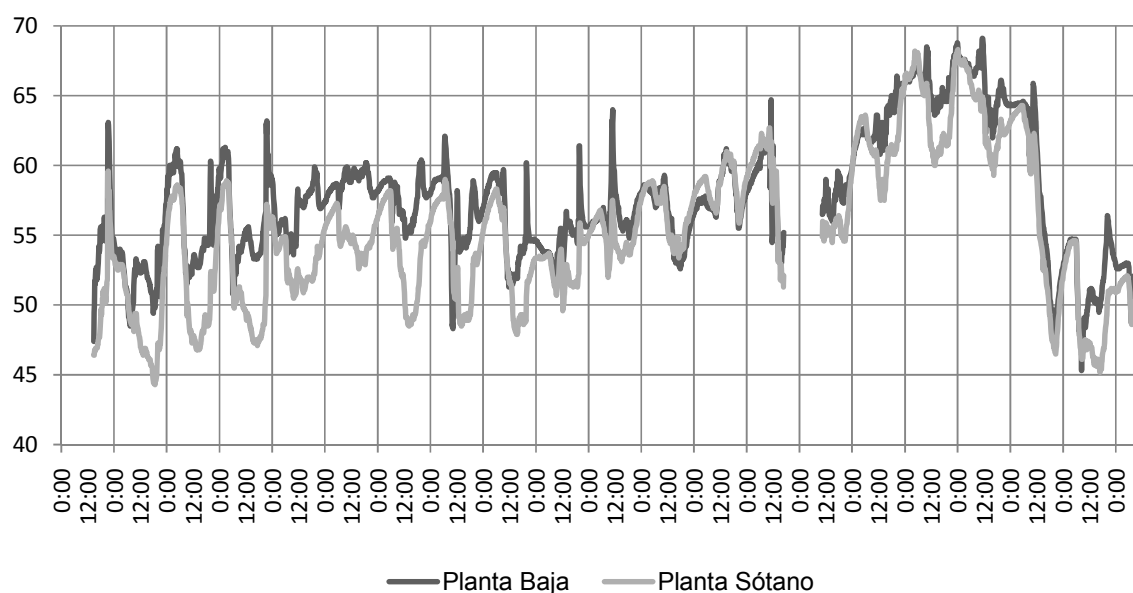


Figura A3.2: Humedades Relativas del aire interior entre los días 28/05 y 17/06.

Fuente: El autor.

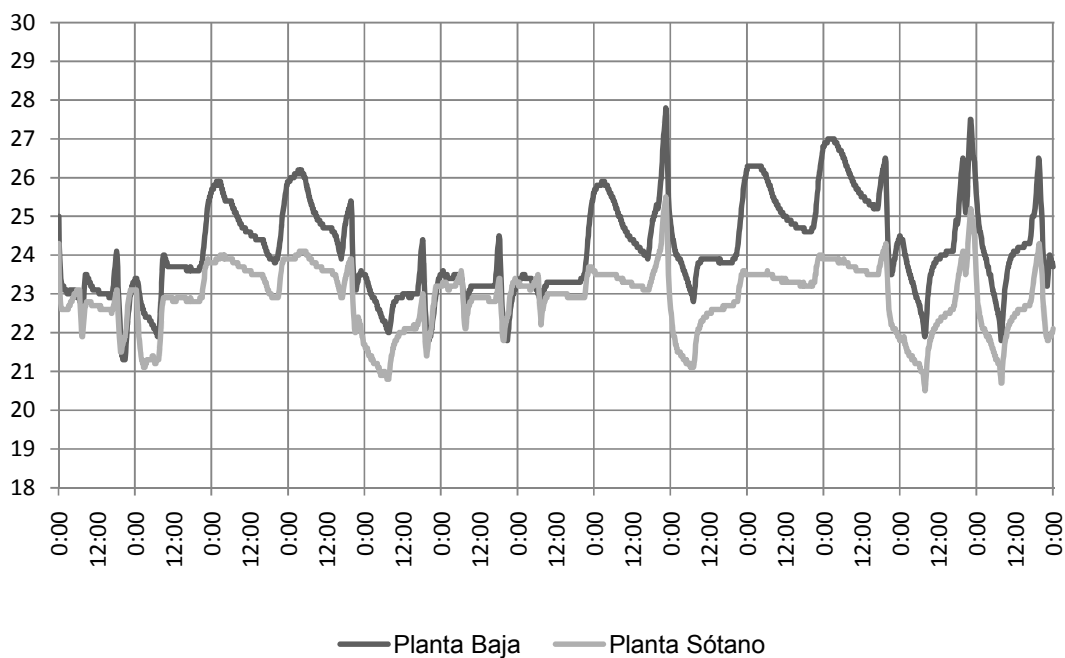


Figura A3.3: Temperatura interiores entre los días 17/06 y 30/06.

Fuente: El autor.

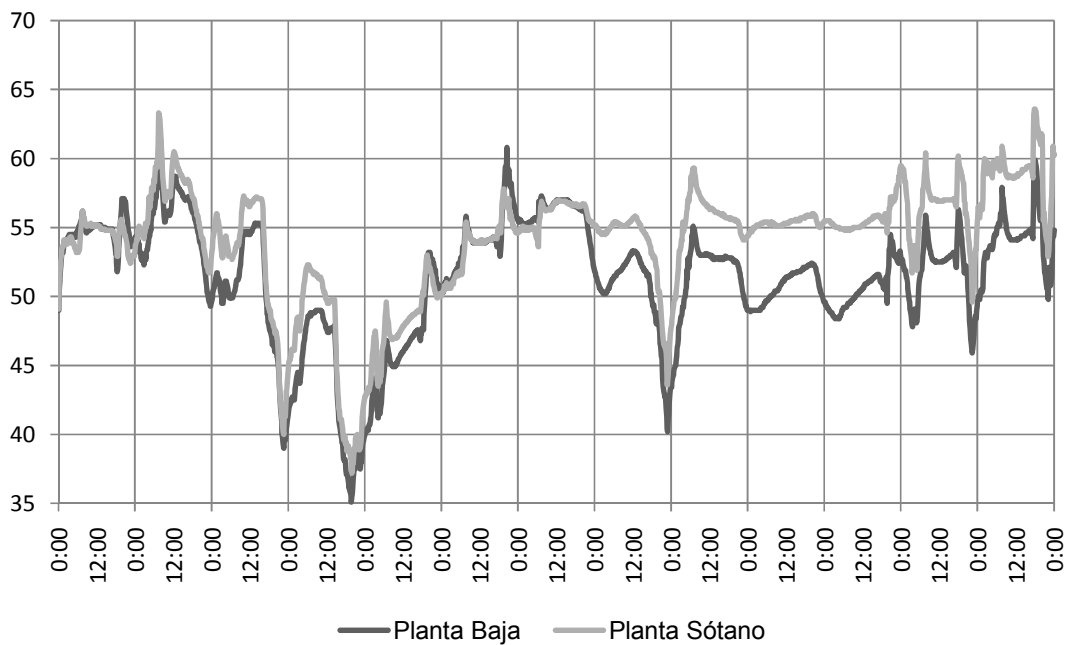


Figura A3.4: Humedades Relativas del aire interior entre los días 17/06 y 30/06.

Fuente: El autor.

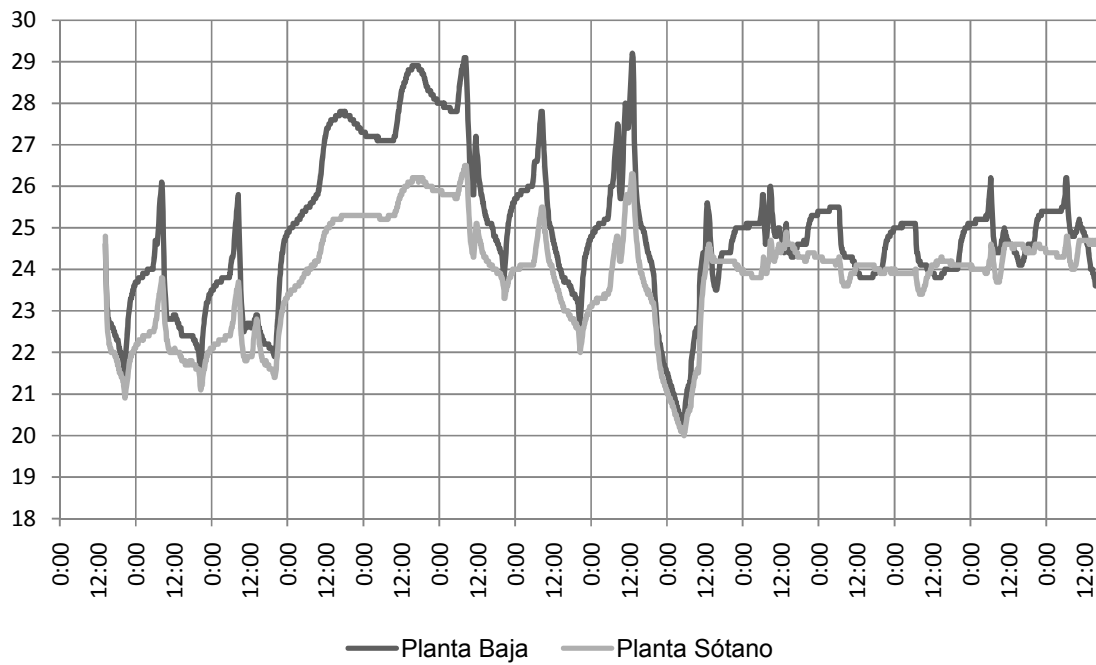


Figura A3.5: Temperatura interiores entre los días 30/06 y 13/07.

Fuente: El autor.

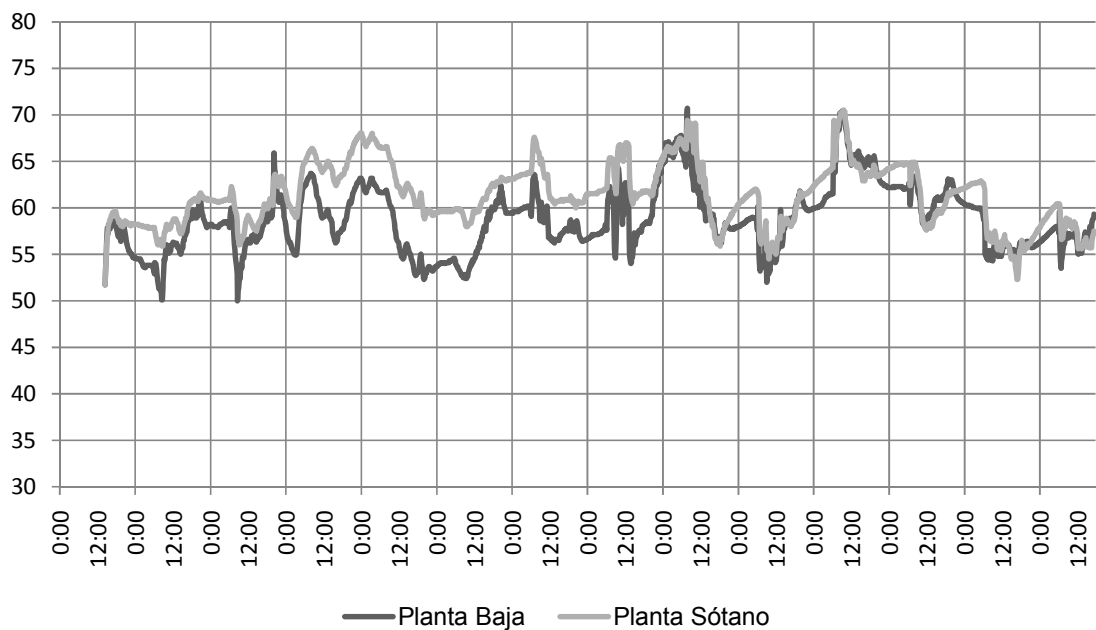


Figura A3.6: Humedades Relativas del aire interior entre los días 30/06 y 13/07.

Fuente: El autor.

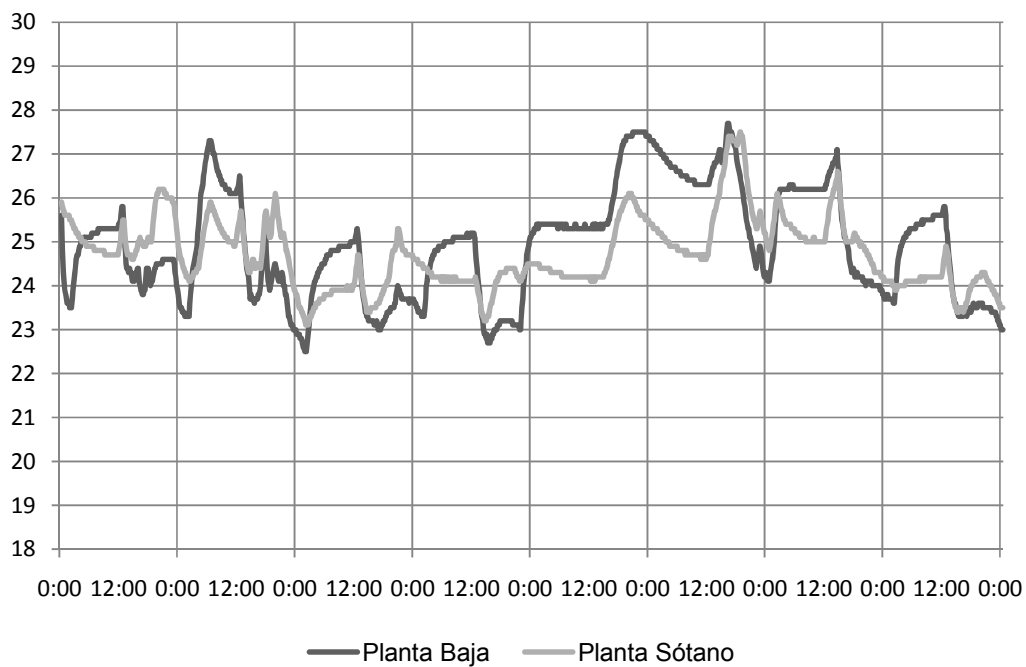


Figura A3.7: Temperatura interiores entre los días 13/07 y 21/07.

Fuente: El autor.

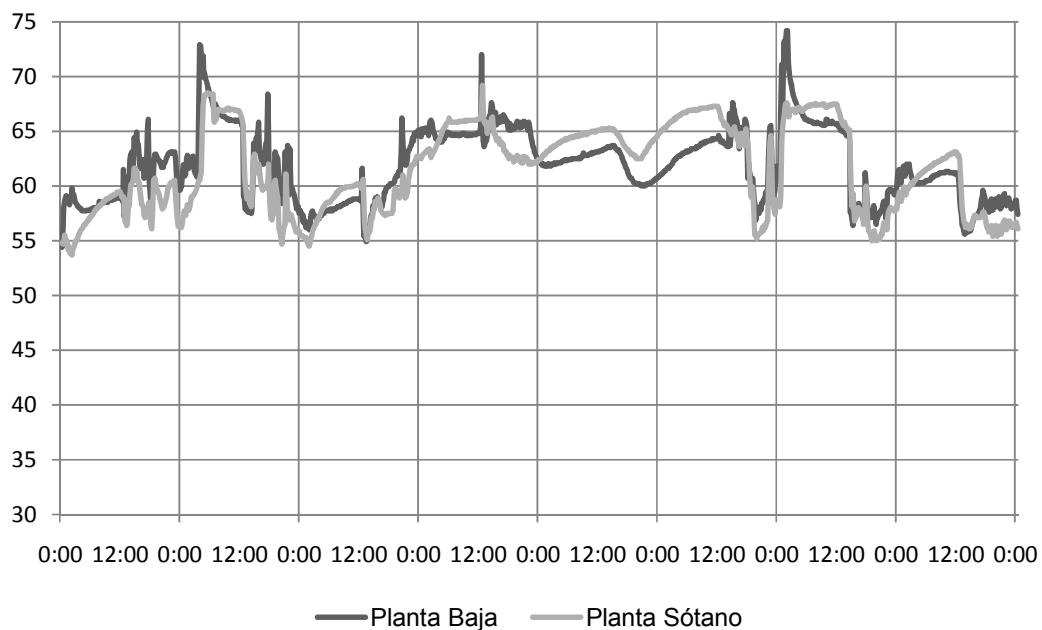


Figura A3.8: Humedades Relativas del aire interior entre los días 13/07 y 21/07.

Fuente: El autor.

ANEXO IV – MEDICIONES DE FLUJOS EN CERRAMIENTOS

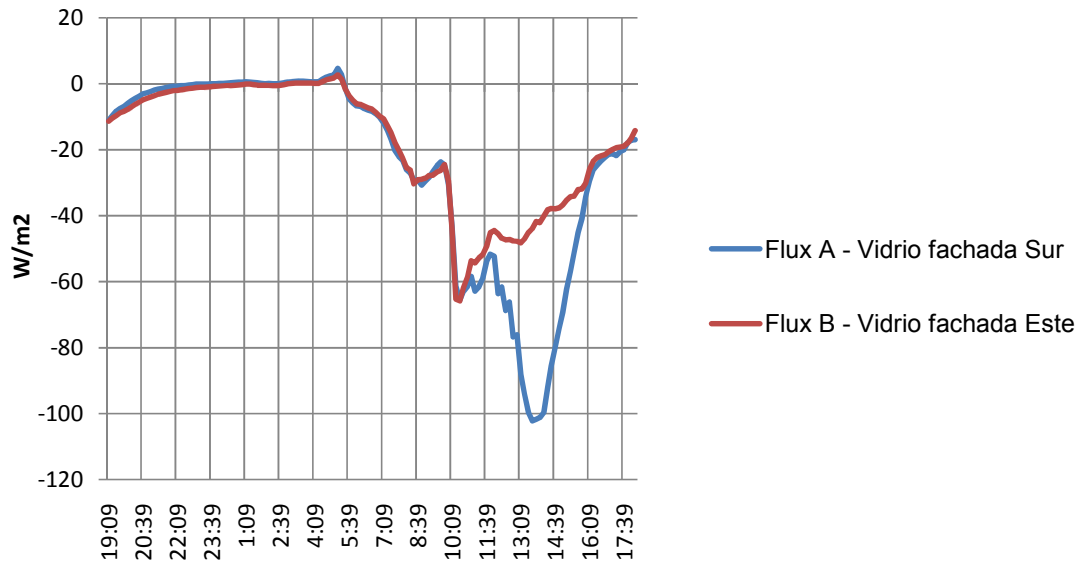


Figura A4.1: Flujos vidrio fachadas Sur y Este (Medición 21/07 – 22/07).

Fuente: El autor.

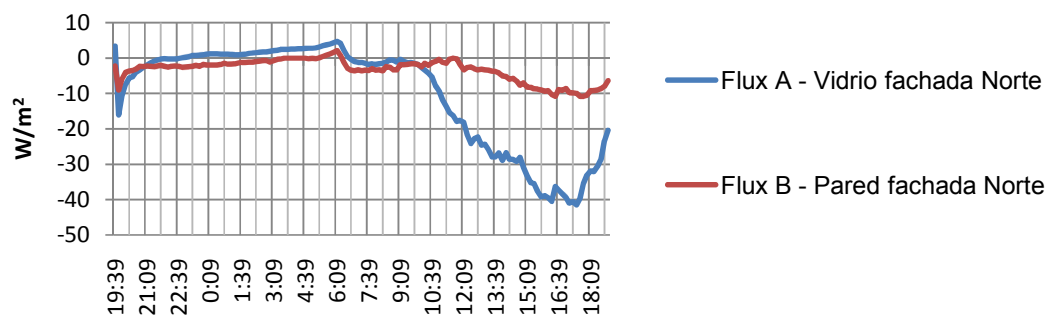


Figura A4.2: Flujos vidrio y pared fachada Norte (Medición 22/07 – 23/07).

Fuente: El autor.

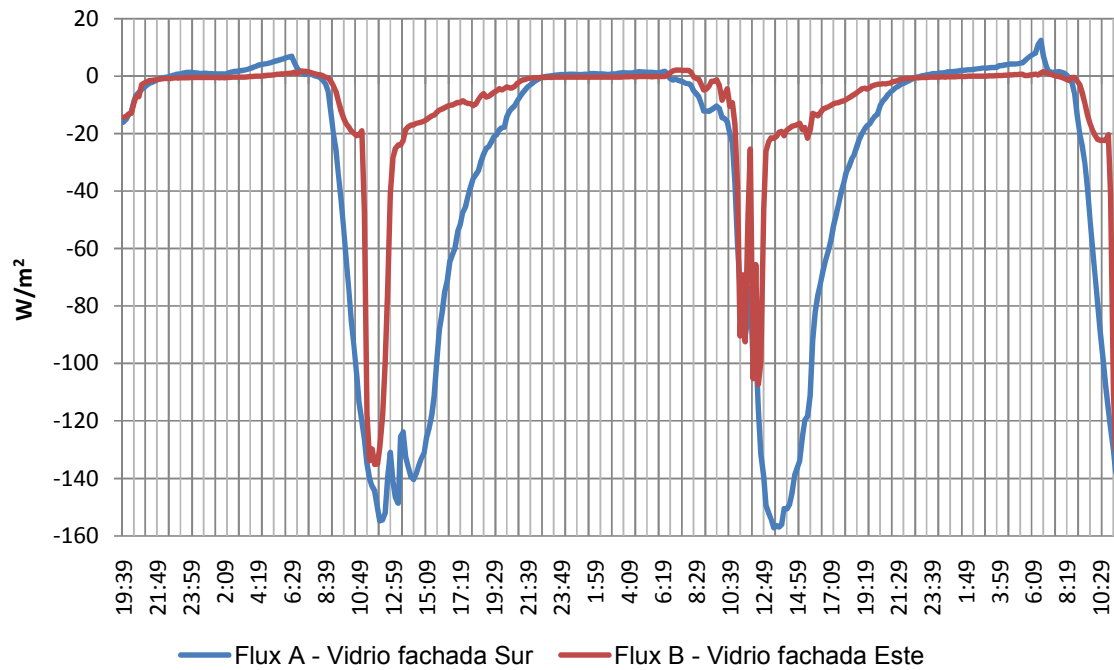


Figura A4.3: Flujos vidrios fachadas Sur y Este (Medición 23/07 – 26/07).

Fuente: El autor.

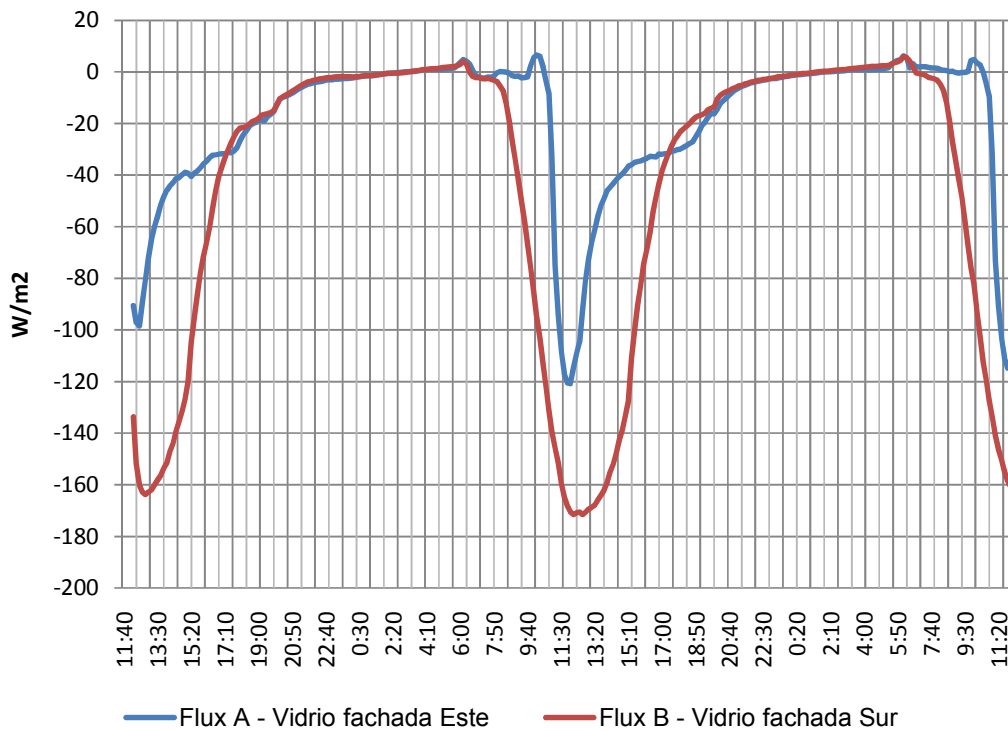


Figura A4.4: Flujos vidrios fachadas Sur y Este (Medición 26/07 – 28/07).

Fuente: El autor.

CONTENIDO DEL CD

- **TESINA HAMILTON DIAS**
- **TESINA HAMILTON DIAS RESUMEN**
- **PLANOS**
- **MEDICIONES IN SITU**