



HAL
open science

Architecture adapted to climate in the work of Le Corbusier: the Maison du Brésil in Paris

Ignacio Requena-Ruiz

► **To cite this version:**

Ignacio Requena-Ruiz. Architecture adapted to climate in the work of Le Corbusier: the Maison du Brésil in Paris. Palapa Journal of Scientific Research in Architecture, 2013, 1 (3), pp.35-53. halshs-01279894

HAL Id: halshs-01279894

<https://shs.hal.science/halshs-01279894v1>

Submitted on 27 Feb 2016

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0 International License

ARQUITECTURA ADAPTADA AL CLIMA EN LA OBRA DE LE CORBUSIER: LA CASA DE BRASIL EN PARÍS.

Autor: Ignacio Requena Ruiz

RESUMEN

La crisis del internacionalismo en arquitectura en los años 30 produjo un giro en la obra de uno de sus máximos exponentes, Le Corbusier. Desde entonces, la relación con el lugar, el clima y la cultura local marcaron una sucesión de proyectos y obras que aproximan sus ideas a la actual sostenibilidad.

A partir de las actuales técnicas de monitorización y simulación energética, esta investigación desarrolla un método que permite estudiar el edificio de la Casa de Brasil (Paris), como ejemplo de la aplicación de sus principales sistemas de control ambiental: el *brise-soleil* y el *aerateur*.

Con el objetivo principal de arrojar luz sobre la funcionalidad medioambiental de las propuestas del arquitecto suizo, la investigación indica como ambas soluciones formaron parte de una respuesta global hacia el clima, en la que el trabajo sobre los aspectos formales y constructivos de la arquitectura desde una perspectiva científica, constituyó el núcleo de su adaptación al medio.

Palabras clave: arquitectura bioclimática; Le Corbusier; simulación energética; sostenibilidad.

Architecture adapted to the climate in the work of Le Corbusier: the Maison du Brésil in Paris.

SUMMARY

The internationalism in architecture crisis during the 30s, turned the work of one of its outstanding members, Le Corbusier. From that moment on, the adaption to the place, the climate and the local culture marked his designs and buildings, making it closer to the current idea of sustainability.

This research develops a method that applies the current techniques of energy monitoring and simulation to the study of the House of Brazil building, as a example of Le Corbusier's main devices for environmental control in architecture: the brise-soleil and the aerateur.

With the aim to shed light on the environmental functionality of the Swiss architect proposals, this article shows both systems like parts of a comprehensive response to climate. As a result, shape and construction understood from a scientific point of view, became the core of the adaption of his architecture to the environment.

Keywords: bioclimatic architecture; Le Corbusier; energy simulation; sustainability.

1. INTRODUCCIÓN

El periodo internacionalista de la Arquitectura Moderna de los años veinte fue sólo una expresión concreta de la modernidad, enmarcada principalmente en el contexto de Centroeuropa y en el periodo entreguerras (Calduch, 2003: 43). Al basarse en los avances de industria y técnica, con el objetivo de racionalizar y democratizar la arquitectura, obtuvo el apoyo de influyentes parcelas del poder político y económico. En realidad, el *Estilo Internacional* acuñado por Henry-Russell Hitchcock y Philip Johnson, fue asumido como vehículo para la colonización cultural y tecnológica de los países industrializados, lo cual constituyó una operación mediática prolongada durante todo el s. XX (Colomina, 1994).

De este modo, la técnica entendida como medio para someter a la naturaleza, convirtió la Arquitectura Moderna en una verdadera «máquina de habitar (*machine à habiter*)» (Le Corbusier, 1998: 73) extendida internacionalmente. El usuario final fue privado de su individualidad en favor de una mayor universalidad a través de la normalización de sus parámetros antropométricos, higrotérmicos y sociales (Ábalos, 2001: 72).

Le Corbusier, uno de los principales ideólogos de las vanguardias, desarrolló dos soluciones técnicas que sustentaban su posición conceptual: el *sistema Dom-ino* (1914) como mecanismo estructural y la «respiración exacta (*respiration exacte*)» como sistema de climatización. Su conjunción sirvió para elaborar una versión teóricamente verosímil de la Arquitectura Internacional, puesta a prueba en los «grandes trabajos (*grands travaux*)» a final de los años 20.

Sin embargo, la incapacidad técnica para resolver eficazmente los problemas reales de la arquitectura (Torres, 2004: 145), le condujo hacia un periodo de investigación sobre la adaptación del edificio al medio ambiente, desarrollado en dos fases. En la primera etapa, durante los años 1930-45, acometió el control del soleamiento, así como la construcción con materiales y sistemas tradicionales. En la segunda, entre 1950-65, sus inquietudes se ampliaron al control de la ventilación, humedad ambiental e inercia térmica, a partir de una perspectiva más metodológica. A lo largo del proceso trató de recuperar las enseñanzas de la cultura constructiva tradicional sin perder el papel renovador de la modernidad.

La primera etapa culminó con la «*Unité d'Habitation* (Unidad de Habitación)» (Marsella, 1947), donde la geometría de las cartas solares del momento determinó la formalización de las fachadas y sintetizó un prototipo heliotécnico. Surgió entonces el esquema de «*brise-soleil* (quebra-sol)» definitivo, sistema que incorporó al resto de trabajos desde entonces.

El edificio de la *Casa de Brasil* (París, 1956) es heredero de este prototipo (figura 1), modificado tras comprobar los desajustes de la propuesta inicial y mejorado con algunos de los recursos bioclimáticos aprendidos de otros climas (Siret, 2004) y experimentados en las construcciones de la India (Ahmedabad y Chandigarh, 1951-1965).



Figura 1. Casa de Brasil. Fachada sureste. Estado actual.¹

Si el principal consumo energético de un edificio construido viene provocado por la consecución del confort ambiental, analizar la *Casa de Brasil* desde el punto de vista bioclimático mediante el empleo de las actuales técnicas de monitorización² y simulación³, muestra nuevas conclusiones metodológicas y proyectivas.

¹ Todas las fotografías y gráficos han sido realizados por Ignacio Requena Ruiz.

² Proceso de observación, mediante instrumentos de medición especiales, el curso de uno o varios parámetros ambientales en función del cambio de las condiciones de contorno.

³ Reproducción del proceso real de acciones térmicas, lumínicas o eólicas con la base de un modelo de cálculo abstracto que permite anticipar el comportamiento del edificio con suficiente aproximación a la realidad.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

El proceso de análisis ha sido estructurado en tres fases que permiten un estudio progresivo del funcionamiento energético pasivo de la arquitectura.

2.1. Análisis bioclimático

La primera fase consiste en la valoración de las exigencias generales del clima, analizando la relación directa existente entre la arquitectura y los parámetros climáticos del emplazamiento.

A partir de los datos climatológicos de referencia obtenidos experimentalmente en las estaciones meteorológicas de Paris-Montsouris y Paris-Orly⁴, se elaboran dos climogramas de confort higrotérmico diferentes y complementarios. El Climograma de Bienestar Adaptado (Neila, 2004: 250), basado en la teoría de la carta bioclimática de Olgay (Olgay, 1998: 28), se ha empleado para el estudio de los periodos de confort higrotérmico, requerimientos de sombra, radiación y ventilación. El Climograma de Givoni, vinculado al ábaco psicrométrico, acota la efectividad de las medidas bioclimáticas pasivas o activas (Givoni, 1981).

La adaptación de la forma arquitectónica a las exigencias del emplazamiento se valora mediante el coeficiente volumétrico de transmisión de calor G. Su valor marca el grado de exposición al ambiente exterior, lo cual es significativo bien de la capacidad de conservación de la energía en climas fríos ($G < 1.00-1.10$), o bien de su aptitud al intercambio energético con el aire en climas tropicales (Yáñez, 2008).

$$G = \frac{\sum K_m S_m + \sum K_v S_v + \sum \gamma K_r S_r + Per P_p}{V_T} + 0.35n \quad (1)$$

La adecuación de los sistemas de cerramiento y protección solar se analiza proyectando sus máscaras de sombra sobre las cartas solares y comparándolas con las exigencias de sombra/radiación obtenidas de los climogramas previos.

2.2. Análisis higrotérmico global

Se estudia el funcionamiento ambiental del edificio a largo plazo, para lo cual son empleadas mediciones en obra (monitorización) y modelos informáticos (simulación).

⁴ Distancia entre el edificio y las estaciones: Paris-Montsouris (0.7 km) / Paris-Orly (10.5 km). Datos compuestos por temperatura media, máxima y mínima; humedad relativa; velocidad media y dirección del viento; índice de nubosidad medio; radiación global y difusa.

La monitorización, además de suponer un análisis concreto de la realidad construida, constituye un mecanismo de verificación de la precisión de las simulaciones informáticas⁵. Se desarrollan como medidas *short-term* durante las semanas promedio de invierno y verano, analizando los valores de: temperatura del aire, humedad relativa y temperatura radiante.

El registro de temperatura y humedad relativa fue realizado de manera continua usando sensores automatizados con sondas independientes que almacenaban las lecturas en la memoria interna (*dataloggers*)⁶. El protocolo y la ubicación de los sensores se basa en los criterios de la ISO 7730:2005 y el *Fundamentals Handbook* (ASHRAE, 2009).

Los sensores fueron dispuestos de manera equidistante desde el cerramiento exterior hacia el interior, con el objetivo de medir con detalle la eficacia de cada una de las soluciones. La distancia entre la fachada y la zona interior de la estancia quedó dividida para poder registrar la gradación térmica lograda por el sistema de cerramiento, la ventilación natural y la inercia térmica del edificio. La frecuencia de medida de los *dataloggers* fue de 1 minuto, aunque posteriormente fueron promediadas cada 30 minutos según los intervalos de comparación con los datos meteorológicos de referencia.

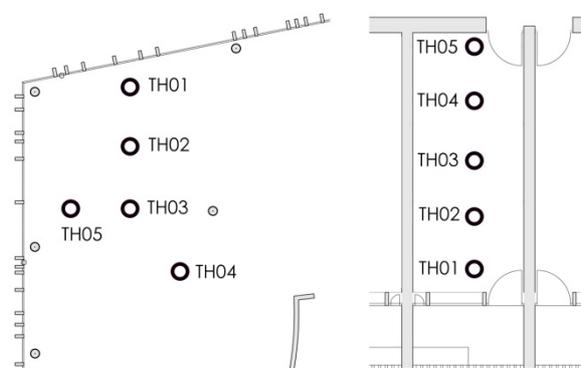


Figura 2. Ubicación de los dataloggers en la zona noroeste de la planta baja y en la habitación

Las simulaciones informáticas⁷ juegan el papel de medidas *long-term* que reflejan el comportamiento del edificio a lo largo del año. El procedimiento responde a los principios establecidos por la física de transferencia de calor que considera los mecanismos de

⁵ La diferencia entre la monitorización y la simulación del modelo en condiciones exteriores semejantes indica un error medio en las lecturas de temperatura durante el día de 2,83% ($D_m = 2,42$).

⁶ *Dataloggers* modelo PCE-HT71 de la marca PCE Instruments Ltd. Rango de medición -35...+70 °C / 0...100 % Hr, precisión ± 0.5 °C / ± 3.0 % Hr y resolución 0.1 °C / 0.5 % Hr.

⁷ Simulación higrótérmica realizada mediante *DesignBuilder Software* empleando el motor de cálculo *Energyplus* del U.S. DOE (Departamento de Energía de Estados Unidos).

conducción, convección y radiación, además de acumulación e inercia térmica. Como complemento al apartado experimental, la simulación permite ensayar el modelo del edificio en condiciones exteriores e interiores controladas que sólo podrían existir de este modo.

Con objeto de analizar y comparar los resultados numéricos obtenidos, se usaron tres coeficientes:

- Coeficiente de estabilidad térmica: mide la inercia térmica del edificio comparando la amplitud de las temperaturas interiores con la amplitud de las temperaturas exteriores. Valores próximos a uno indican una nula inercia térmica, mientras que los cercanos a cero significan una gran estabilidad térmica (Neila, 2004: 371).

$$CET = \frac{T_{int} - t_{int}}{T_{ext} - t_{ext}} \quad (2)$$

- Desfase de la onda térmica: tiempo que tarda la onda calor en atravesar los cerramientos y afectar a la temperatura interior. Su valor es de varias horas y depende directamente de la inercia térmica del sistema constructivo (Neila, 2004: 245).

$$d (hr) = 0.53 \times \frac{T}{2} \times \sqrt{\frac{\rho \times C_e}{\pi \times \lambda \times T}} \times L \quad (3)$$

- Voto medio previsto (*predicted mean vote PMV*): evaluación comparativa de la sensación térmica según la formulación establecida en la norma ISO 7730:2005. A nivel comparativo se tomarán unas condiciones constantes de arropamiento 1.0 clo, tasa metabólica 1.0 met y velocidad de aire 0.2 m/s.

2.3. Análisis pormenorizado

El estudio detallado fue realizado combinando la monitorización y simulación de los espacios tipo más significativos, lo cual permite conocer: distribución térmica, dirección y velocidad de movimiento del aire; evolución de los niveles lumínicos y eficiencia de iluminación natural.

En este caso, el proceso de monitorización analiza temperatura y velocidad del aire así como niveles de iluminancia, todo ello con un proceso de «medidas puntuales (*spot monitoring*)».

Para los parámetros de movimiento del aire, además de las lecturas térmicas previas de los *dataloggers*, fue empleada una sonda termoanemométrica de hilo caliente⁸. El protocolo de monitorización estuvo basado en las recomendaciones de la Comisión Europea (Belgian Building Research Institute, 1998) y según los criterios establecidos por Etheridge (1996).

Las medidas de iluminancia se han realizado con un luxómetro⁹. La monitorización vino determinada según los criterios establecidos por la Agencia Internacional de la Energía (Atif et al., 1997).

En ambos casos se optó por una frecuencia de lectura de 2 h, que permitía medir la evolución de las dos magnitudes a lo largo del día con, al menos seis sesiones de medición por jornada de trabajo. El proceso comenzaba con la medida de las condiciones exteriores, seguía con una retícula de puntos dentro del espacio objeto de estudio y terminaba otra vez con la lectura externa.

Las simulaciones informáticas se realizaron según modelos de cálculo que, además reportan al análisis gráfico y dinámico del comportamiento de cada uno de los fenómenos dentro de la estancia de estudio.

La temperatura y movimiento del aire (velocidad y dirección) se simularon con un motor de dinámica de fluidos (CFD)¹⁰ a partir de las condiciones de contorno en los días promedio de cada estación.

Al igual que en el trabajo experimental, la simulación lumínica¹¹ evalúa el confort lumínico durante el solsticios y los equinoccios a intervalos de 2 h, además de medir el aprovechamiento de la luz natural durante todo el año según las condiciones exigidas por el uso interior. Los resultados muestran niveles de iluminancia, factores de luz diurna y autonomía de luz solar anual en cada uno de los espacios.

⁸ Anemómetro de hilo caliente modelo PCE-424 de la marca PCE Instruments Ltd. Rango de medición 0.2...20.0 m/s / 0...50 °C, precisión ± 0.01 m/s / ± 0.8 °C y resolución 0.1 m/s / 0.1 °C.

⁹ Luxómetro modelo PCE-L335 de la marca PCE Instruments Ltd. Rango de medición 0...400.000 lux, precisión 3 % de la lectura y resolución 0.01 lux (en el menor rango de medición).

¹⁰ Simulación con Designbuilder más el motor CFD basado en el algoritmo de cálculo Simplr.

¹¹ Simulación con Ecotect más los motores de cálculo *Radiance* y *Daysim*, que parten de un modelo matemático híbrido entre el método Monte Carlo y el trazado de rayos (*raytracing*), dividiendo la luz en tres componentes: luz directa, luz especular indirecta y luz indirecta difusa.

3. RESULTADOS

3.1. Descripción del edificio

El edificio de la *Casa de Brasil* (48° 50' N - 2° 20' E) está emplazado dentro del complejo de la *Ciudad Internacional Universitaria de París* (CIUP). El clima (Cfb)¹² es templado oceánico de veranos suaves e inviernos fríos, cuyas temperaturas medias son 19.5°C y 5.2°C respectivamente, y humedad relativa media anual del 73.3%.

La parcela original era sensiblemente rectangular con su mayor dimensión en dirección este-oeste. Hacia el este recae a la Avenida Pierre de Coubertin y al oeste mira a la *Casa de Noruega*, distanciada unos 40 m e inaugurada en 1954. En la dirección perpendicular, el edificio más próximo en el momento de la construcción era la *Casa de Japón*, inaugurada en 1929, situada 52 m al norte¹³.



Figura 3. Fachada noroeste. Bloque y planta baja con *pan de verre ondulatoire*. Estado actual.

El anteproyecto del edificio de la *Casa de Brasil* de París fue elaborado por el arquitecto brasileño Lucio Costa (1902-1998) en el año 1952¹⁴, aunque decidió dejar el proyecto de ejecución y la dirección de la obra en manos de Le Corbusier y su «*Atelier 35S*»¹⁵. El programa consistía en una residencia universitaria para estudiantes e investigadores brasileños, a la que se sumaron equipamientos públicos destinados a constituir un polo de difusión de la cultura brasileña.

¹² Según la clasificación climática Köppen-Geiger basada en la caracterización por índices fitoclimáticos.

¹³ En la actualidad están, además, hacia el sur la *Residencia André de Gouveia* es de 1967, mientras que hacia el norte la *Casa de la India* de 1968.

¹⁴ Constaba de plantas, secciones esquemáticas, perspectivas exteriores e interiores y una memoria descriptiva.

¹⁵ Denominación coloquial del atelier de Le Corbusier emplazado en el 35 Rue de Sèvres de París.

Aunque Le Corbusier no prestó especial atención a este proyecto¹⁶, su influencia resultó significativa en dos elementos. En primer lugar por la ruptura formal y constructiva entre la planta y el bloque de habitaciones. Solución que permitió librar el *Acueducto de Rungis* en la cimentación y una mayor libertad formal en los espacios diáfanos y representativos. En segundo lugar, en la aparición del *brise-soleil* de la fachada sureste como resultado de su propia experiencia ante la radiación solar directa¹⁷.

La formalización final manifiesta los tres bloques programáticos: planta baja, usos públicos; fachada noroeste del bloque, servicios de residentes; fachada sureste del bloque, alojamientos.

Las discrepancias entre ambos arquitectos llevaron a Lucio Costa a desistir de la autoría del proyecto para conseguir que la obra fuera ejecutada entre 1956 y 1959. Aunque el resultado final parezca más cercano al imaginario del maestro suizo, la obra no puede entenderse sin el proyecto original del arquitecto brasileño.

Las principales soluciones bioclimáticas integradas en este edificio fueron el control de la radiación solar, por medio del *brise-soleil* (figura 4), y la permeabilidad al aire, con el «*aérateur* (aireador)» (figura 5). También aparecen otros mecanismos pasivos, como la construcción de alta inercia térmica y la cubierta ajardinada, que influyen en el comportamiento ambiental del edificio.



Figuras 4 y 5. *Brise-soleil* sureste y *aérateur* de planta baja. Estado actual.

¹⁶ Destacar que el *Atelier 35S* estaba inmerso en las obras de la India (Chandigarh y Ahmedabad) y Ronchamp, además de en el proyecto del Convento de la Tourette.

¹⁷ Así lo indica en la carta a Lucio Costa. Documento FLC K1-8-197 del Archivo de la Fondation Le Corbusier.

Control de radiación solar

La lógica geométrica del cálculo de ángulos solares establecida por Le Corbusier durante los años treinta y desarrollada metodológicamente en el *Atelier des Bâisseurs* (AtBat)¹⁸, determinaron la formalización del *brise-soleil* como solución de la fachada sureste del bloque. En este sentido, la *Casa de Brasil* fue una evolución del citado prototipo heliotécnico.

La modulación de habitaciones y estructura, regida por el *Modulor*¹⁹, establecía a su vez las proporciones de altura y anchura del *brise-soleil*. El parasol y la estructura fueron ejecutadas a la vez con el mismo hormigón *in-situ*, por lo cual constituían un conjunto de soporte físico y ambiental al programa interior²⁰. El antepecho, la celosía y las jambas fueron construidos con piezas de hormigón prefabricado acabadas en grava.

El AtBat valoró el *brise-soleil* con la misma rigurosidad que la estructura o las instalaciones, prueba de ello son los numerosos documentos de trabajo interno que abordaban el dimensionado de diferentes propuestas de parasol, el análisis de sombras proyectadas y los estudios de niveles de iluminancia interiores.

A nivel funcional el *brise-soleil* quedó vinculado al espacio interior, convirtiéndose en la imagen representativa de los edificios de Le Corbusier destinados al alojamiento colectivo. En contraposición, los espacios colectivos inherentes a estos proyectos requirieron una envolvente distinta, el «*pan de verre ondulatoire* (pañó de vidrio ondulatorio)». Un cerramiento complementario elaborado por Xenakis²¹ conformado por una carpintería de elementos verticales de hormigón, cuya modulación variable producía efectos dinámicos al recibir la luz del sol.

Los cerramientos de vidrio en planta baja fueron realizados con esta segunda solución, que además facilitó las formas curvas que la caracterizan.

¹⁸ Gabinete técnico fundado en 1943 para el desarrollo de los proyectos de ejecución de las *Unité d'habitation* y la *Manufactura Duval* (Saint-Dié, 1946).

¹⁹ Regla de proporciones antropométricas desarrollada por el arquitecto suizo-francés para estandarizar las dimensiones humanas en arquitectura.

²⁰ Esta idea es apreciable en cualquiera de las múltiples imágenes de la construcción de la *Unité d'Habitation* donde estructura y *brise-soleil* configuran el conjunto sin existir otros elementos.

²¹ Iannis Xenakis (1922-2001), ingeniero griego que centró su mirada creativa en los modelos probabilísticos de composición aplicados en arquitectura y música contemporánea.

Construcción permeable al viento

Aunque el origen fundamental del prototipo fue la respuesta al soleamiento, la implementación de soluciones de ventilación aportadas por Missenard²² en los proyectos de la India, resultó imprescindible para entender la *Casa de Brasil*.

En la planta baja los *aérateurs* respondían a la modulación del *pan de verre ondulatoire*, con una disposición estratégica en fachadas opuestas que propiciaba las ventilaciones cruzadas y permitía extraer el aire caliente del interior en cualquiera de las direcciones del viento.

En las habitaciones se dispuso un *aérateur* en fachada para la entrada de aire exterior, con una salida a través de una compuerta interior unida a un conducto de ventilación vertical. Solución forzada para evitar ventilaciones cruzadas a través de espacio de usos distintos, según delimitaron la normativa de incendios y los requerimientos de la *Ciudad Internacional Universitaria*.

Inercia térmica y cubierta ajardinada

La lectura formal tectónica de la obra de Le Corbusier, acompañada de la eficacia del moderno hormigón armado para obras de gran porte, derivó irremediablemente en un sistema de construcción pesada. Su alta inercia térmica creaba un ambiente interior independiente de las oscilaciones térmicas exteriores.

Por el contrario, los graves problemas de dilataciones que presentaban las estructuras de hormigón expuestas al soleamiento directo, provocó la «*toit-jardin* (cubierta ajardinada)» como aislamiento térmico (Le Corbusier, 1946: 140).

3.2. Análisis bioclimático

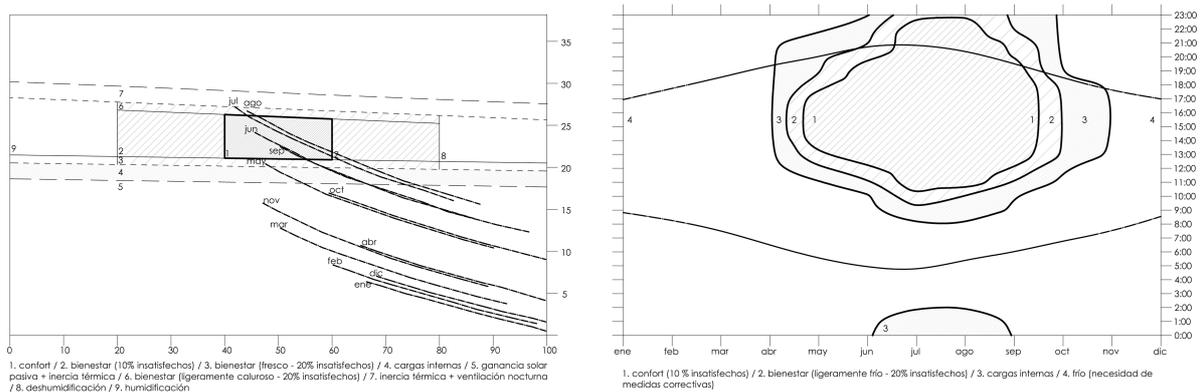
Según el método desarrollado en el apartado 2.1, queda dividido en el estudio de los climogramas, la forma arquitectónica y el control de la radiación solar.

Climogramas

El Climograma de Bienestar Adaptado indica la necesidad de recibir radiación solar prácticamente todo el año para alcanzar las condiciones de confort, ya que normalmente los

²² André Missenard (1901-1989), ingeniero francés que investigó sobre confort humano, temperatura operativa y calefacción radiante desde los años veinte. Suyos fueron los primeros trabajos sobre temperatura efectiva para la determinación del confort con el nomograma de Missenard (Missenard, 1937).

valores térmicos quedan por debajo de la línea de sombra (figura 6). El periodo de sombra va desde mayo hasta septiembre con su máximo en julio y agosto, cuando es preciso proteger de la radiación desde las 10:00 hasta la puesta de sol. Dentro de este lapso temporal, ni el climograma ni su proyección al diagrama de isopletras (figura 7), vuelven a mostrar la necesidad de otro tipo de medidas para mitigar los efectos del calor.



Figuras 6 y 7. Climograma de Bienestar Adaptado y diagrama de isopletras en París.

Por otra parte, según el Climograma de Givoni²³ (figura 8), durante primavera, otoño e invierno se requiere radiación solar directa, lo cual confirma las indicaciones del climograma previo. La temperatura sólo está en el rango de confort durante el 1.7% del tiempo y aumenta hasta el 22.1% con el uso de técnicas pasivas básicas, como la inercia térmica y la ganancia solar. El resto del tiempo únicamente resulta efectivo el aporte externo de energía calorífica con la calefacción.

Con respecto al verano, las condiciones exteriores son confortables durante el 25.4%, extendiéndose hasta el 92.1% con empleando la inercia térmica, ventilación natural y deshumidificación en las centrales del día, además de los recursos invernales previos durante la noche y las primeras horas del día en junio y septiembre.

En resumen, el Climograma de Givoni indica que los sistemas pasivos resultan eficaces durante el 45.4% del año, mientras que el aporte de calefacción es preciso en el 54.4% del tiempo y de aire acondicionado únicamente en el 0.2%.

²³ Datos de confort calculados con *Climate Consultant v.5.2* según el modelo de confort de la ISO 7730.

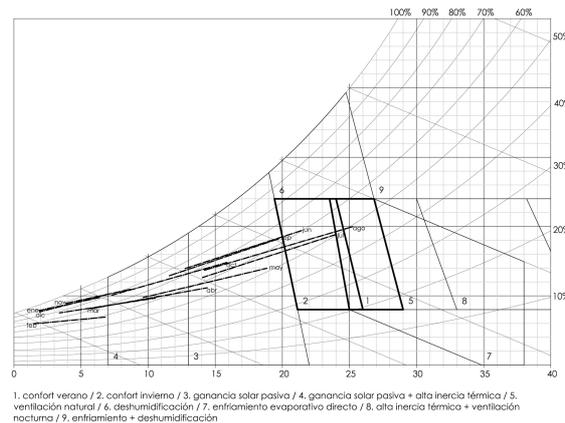


Figura 8. Climograma de Givoni en París.

Forma y orientación

La planta baja y el bloque presentan características formales, constructivas y ambientales diferentes entre sí, lo cual se refleja en el funcionamiento energético del edificio.

La planta baja alberga el 24% de superficie del programa en una pieza extendida en horizontal cuyo coeficiente G es 1.11. A pesar de ello, al estar protegida por el bloque y tener una relación de vidrio/opaco de 1:4.7, se reduce su nivel de exposición al exterior y consigue una mayor estabilidad térmica. Aunque en menor medida, también colabora la escasa compartimentación y el gran volumen de aire confinado²⁴, sirvan de ejemplo el auditorio y el vestíbulo, que suponen el 67% de la superficie en planta y el 71% del volumen²⁵.

El bloque aloja el 76% restante del programa en una pieza sensiblemente rectangular en altura de coeficiente G 0.47, lo cual muestra la optimización de la forma y los materiales constructivos en este contexto climatológico.

Un análisis de las orientaciones en base a la radiación solar indica el azimuth más favorable en condiciones anuales a 160°, en verano a 122.5° y en invierno a 175.0°. Por lo tanto, el valor óptimo ponderado en estas coordenadas viene condicionado por las bajas temperaturas y el reducido periodo de captación en invierno.

Aunque el límite del complejo de la CIUP con la Avenida Pierre de Coubertain forzó inicialmente la orientación al este, la intuición de acercar el bloque hacia el sureste apareció

²⁴ La efusividad térmica del aire es 400 veces inferior al hormigón, mientras que su volumen es 7,4 veces superior, lo cual provoca una colaboración significativa, aunque no primordial, en la inercia térmica del conjunto.

²⁵ En términos absolutos son 637 m² y 1970 m³

desde los primeros dibujos y escritos de Costa²⁶. Las habitaciones, que suponen el 52% de la superficie construida y contienen una superficie de vidrio de 560 m², quedaron dispuestas con azimut 120.0°, desviándose 55.0° respecto al óptimo pero sólo 2.5° con el estival. En la fachada opuesta, con azimut 300.0°, están los espacios de servicio por plantas que son el 24% de superficie.

La planta baja, al responder en mayor medida a las condiciones formales de la parcela relacionándose con los viarios y edificios más cercanos, presenta las zonas públicas (21%) al oeste con azimut 270.0° y los espacios de personal (3%) al este con azimut 100.0°.

Soleamiento

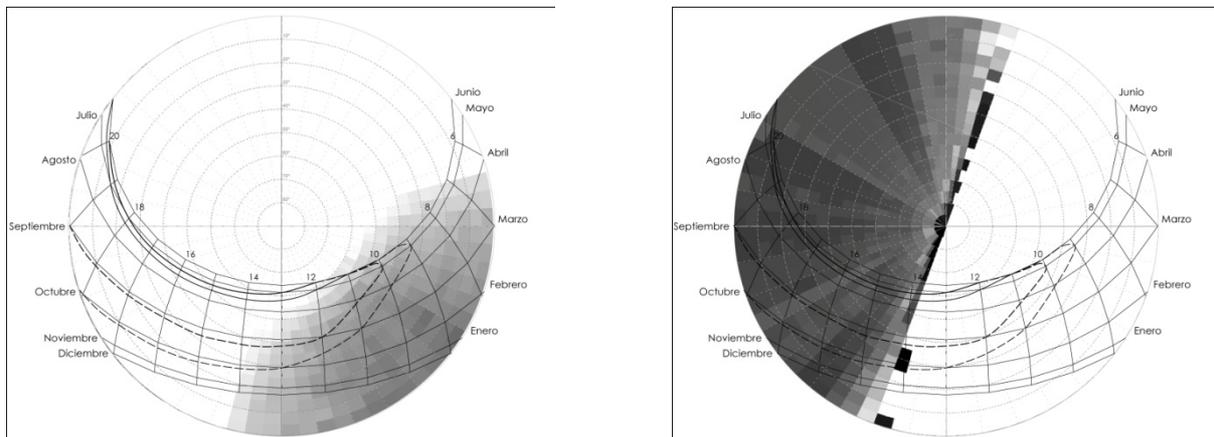
La proyección de las máscaras de sombra de cada fachada sobre las cartas solares distinguen tres variantes: el *brise-soleil* de las habitaciones y las dos orientaciones del *pan de verre ondulatoire* del vestíbulo (noroeste y suroeste).

El *brise-soleil* se extiende de manera uniforme por toda la fachada sin establecer distinciones formales entre habitaciones dobles o sencillas. Su relación profundidad/altura de 1:1.8 le confiere protección al soleamiento directo con ángulos de altura solar superiores a 60.5°. La proporción anchura/altura de 1:1.7 reduce la apertura a un ángulo de 105.0°, lo que permite controlar la radiación de primera y última hora del día.

Los periodos sombra/radiación obtenidos de los climogramas y comparados con las cartas mascarar, indican un ajuste correcto entre las necesidades de sombra y la forma del *brise-soleil* con un desfase aproximado de 1 h en verano, durante la cual el coeficiente de sombra está en el 70.0%, es decir, sigue siendo alto (figura 9). Al contrario, cuando es precisa la radiación solar para atemperar el espacio, el parasol sólo permite la entrada de un 23.6% con límite a las 13:30, momento desde el que no recibe radiación. El coeficiente de sombra medio obtenido en verano es del 93.5% (mínimo 70.0% - máximo 100.0%), mientras que en invierno es del 76.3% (44'1-100.0%).

²⁶ Este criterio aparecía ya en la memoria del anteproyecto por recomendación de los propios estudiantes que vivían en París.

La orientación noroeste del vestíbulo no se adapta a las líneas de sombra desde las 14:00 en adelante, porque está expuesta al sol de poniente (figura 10). La presencia del bloque de habitaciones inmediatamente al sur, de mayor altura y casi perpendicular a la fachada, protege de la radiación de 12:00 a 14:00 y genera sombra sobre la cubierta del vestíbulo, especialmente beneficiosa en verano. Los coeficientes de sombra son del 68.1% (24.1-70%) en verano y del 76.4% (16.9-100%) en invierno, cuantías descompensadas con los requerimientos estacionales. Si bien los valores medios son altos, deben ponderarse teniendo en cuenta que a partir de las 14:00 los coeficientes tan solo alcanzan horquillas entre el 24-31% en el solsticio de verano y del 29-54% en el solsticio de invierno. En consecuencia, la protección se logra principalmente a través de la forma y la orientación.



Figuras 9 y 10. Carta solar y máscara de sombra del *brise-soleil* de fachada sureste y del *pan de verre ondulado* de fachada noroeste.

Al exponer el mismo *pan de verre ondulado* a suroeste, la radiación solar directa se recibe desde las 13:00-14:00 hasta el anochecer durante todo el año. El bloque de habitaciones protege de la radiación directa entre 10:00 y 14:00, a excepción de los meses de verano, cuando la altura del sol hace que la exposición sea prácticamente completa. Los coeficientes de sombra que arroja el cálculo son del 60.1% (11.6-100%) en verano y del 67.4% (13.4-100%) en invierno, aunque de nuevo ponderables, ya que de 13:00 a 20:00 en verano varía entre 14-42% y en invierno de 14:00 a 17:00 entre 14-50%.

3.3. Funcionamiento higrotérmico global

El método descrito en el apartado 2.2 permite valorar el comportamiento higrotérmico general del edificio a largo plazo, para lo cual el estudio se centra en las condiciones de invierno y verano.

Invierno

El periodo más exigente para las condiciones climáticas del emplazamiento tiene lugar durante la estación fría. La temperatura media exterior en la semana promedio es de 4.8°C, con una oscilación de 6.2°C entre mínima y máxima²⁷, con humedad relativa media del 82%, lo cual resulta en un PMV exterior de -5.2 (frío).

Debido a ello, tanto en la monitorización como en la simulación los *aérateurs* han permanecido cerrados, abriéndose exclusivamente para establecer una ventilación sanitaria²⁸. En particular, la monitorización se realizó con el edificio habitado e instalaciones en funcionamiento, mientras que en la simulación se desactivó la calefacción para estimar el comportamiento de los recursos arquitectónicos y las ganancias térmicas por radiación solar.

El vestíbulo muestra una estabilidad térmica alta, como indica el coeficiente de estabilidad térmica de 0.27, con un desfase estimado de 5 h y un PMV de -4.7 (frío). A pesar de su alta inercia térmica, el alto nivel de exposición al exterior, la orientación desfavorable y la sombra proyectada del bloque, reducen las ganancias por radiación solar y no consigue el confort térmico interior.

El bloque de habitaciones tiene una estabilidad térmica mayor, con una estabilidad térmica de 0.21, un desfase de 6 h 20' y un PMV de -3.6 (frío). Los datos corroboran la eficacia de la inercia térmica prevista desde la forma y la construcción que, sumadas a una correcta orientación, mantienen una temperatura media 4.0°C por encima de la exterior.

El espacio abierto confinado en el *brise-soleil* de las habitaciones presenta una temperatura media de 6.0°C, que llega a oscilar hasta 4.7°C. Al estar completamente expuesto al exterior

²⁷ La mínima se da a las 6:30 mientras que la máxima es a las 13:30.

²⁸ Criterio de habitabilidad establecido según Standard 62.1-2007 de la ASHRAE.

su coeficiente de estabilidad térmica es de 1.00, el desfase de 40' y el PMV de -4.9 (frío). Aun así, la capacidad de almacenamiento de la energía solar del hormigón, logra establecer una temperatura media 2.9°C por encima de la exterior.

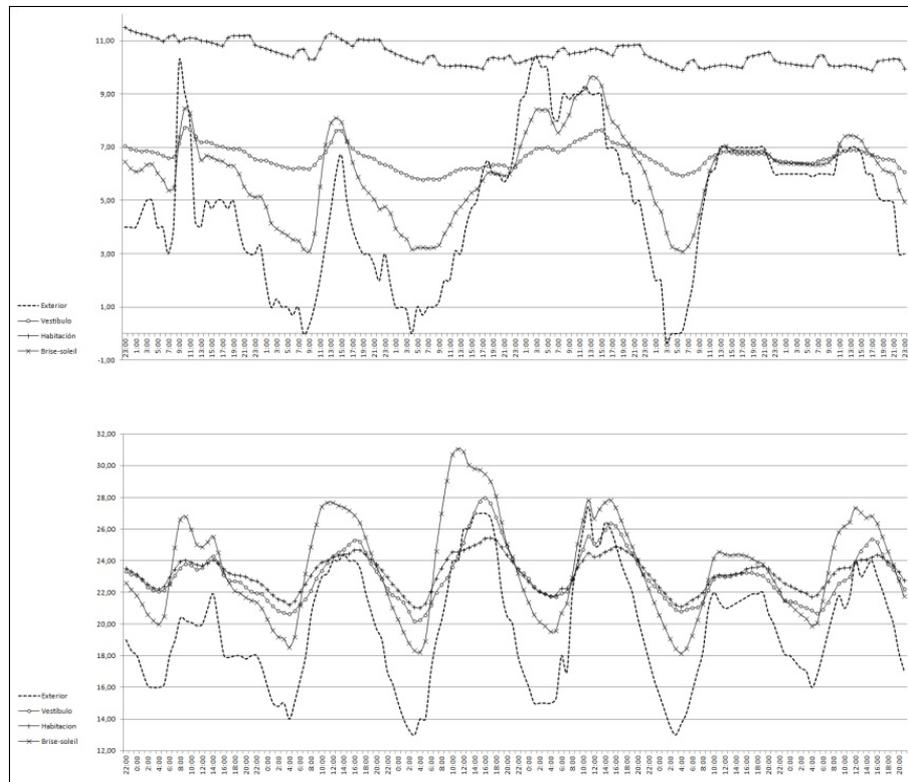


Figura 11. Temperaturas resultado de la simulación en las semanas promedio de invierno y verano.

Verano

Durante el periodo estival la temperatura media de la semana promedio es de 19.6°C, con variaciones de 10.0°C entre máxima y mínima²⁹, una humedad relativa media del 65% y un PMV de -1.1 (fresco).

Al quedar las condiciones exteriores dentro de los márgenes de confort, tanto en la monitorización como en la simulación, se consideraron los *aérateur* abiertos a fin de permitir la salida del aire caliente al exterior. Exclusivamente a nivel comparativo, también fue realizada la simulación del edificio con los *aérateur* cerrados, lo cual sirvió para comprobar su influencia sobre el confort higrotérmico.

La simulación del vestíbulo vuelve a mostrar la asimetría térmica entre la mañana y la tarde, provocada por la orientación. La temperatura máxima se da a las 17:30 con una variación

²⁹ La mínima se da a las 4:00 y la máxima es a las 14:30.

media respecto de la mañana de 1.6°C. El coeficiente de estabilidad térmica obtenido es de 0.47, con un desfase de la onda térmica de 2 h 30' y un PMV resultante de -0.2 (neutro). Los resultados verifican que, a pesar ser una construcción de hormigón y tener un alto nivel de exposición, la inercia del conjunto, la sombra proyectada del bloque y la ventilación natural impiden se exceda el margen de confort por calentamiento del espacio.

Al cerrar los *aérateurs* e impedir la ventilación natural cruzada, la temperatura media sube 1.1°C en la semana promedio, pero las oscilaciones térmicas se reducen a 3.3°C.

El bloque de habitaciones recibe radiación solar directa desde las 6:00 y deja de hacerlo pasado el medio día, aunque el efecto de la inercia térmica hace que la temperatura suba hasta alcanzar la máxima a las 16:30. Las medidas arrojan un coeficiente de estabilidad térmica de 0.31, un desfase de 5 h y un PMV de -0.1 (neutro). Datos que ratifican la compacidad del conjunto y su alta inercia térmica para mantener la temperatura sin grandes variaciones a lo largo del día.

Con los *aérateurs* cerrados la temperatura media sube 1.7°C, con variaciones de 0.9°C. Es decir, tanto las máximas como las mínimas están siempre por encima del caso con ventilación natural, pero las oscilaciones entre ambas son menores.

El conjunto del *brise-soleil* presenta una temperatura media 4.2°C por encima de la exterior, lo cual resulta en un coeficiente de estabilidad térmica de 0.85, un desfase de 30' y un PMV de 0.0 (neutro).

3.4. Análisis pormenorizado

Tal como se describe en el apartado 2.3, la realización de un análisis higrotérmico, de ventilación y niveles lumínicos, detalla el funcionamiento interior de los principales espacios tipo del edificio: vestíbulo y habitación.

Distribución térmica y movimiento del aire

Durante el invierno, con los *aérateurs* cerrados, el comportamiento global basado en las corrientes convectivas provocadas por la baja temperatura de los paños de vidrio. Funcionamiento común tanto si la calefacción está operativa (monitorización) como si no (simulación).

En el vestíbulo se produce una distribución térmica en profundidad condicionada por los ventanales de las fachadas sur y oeste, con un área afectada de 0.7 m y 3.0 m respectivamente, detrás del *pan de verre ondulatoire*. La zona central, de aproximadamente 7.5 m y situada bajo el bloque de habitaciones, presenta un mayor aislamiento y desarrolla una franja de temperatura estable 2.0°C por encima de las perimetrales.

La estratificación vertical sólo es perceptible en las proximidades del vidrio, donde el enfriamiento del aire provoca una diferencia de temperatura entre las caras superior e inferior de hasta 1.4°C. Sin embargo, en la zona central este efecto se ve minimizado hasta 0.5°C y resulta prácticamente inapreciable.

Debido a la estabilidad térmica, a la corriente convectiva y la amplitud del espacio, las velocidades de movimiento del aire monitorizadas y simuladas son de unos 0.10 m/s (inadvertido)³⁰.

En las habitaciones, la distribución térmica en profundidad crea una gradación de 2.6°C desde el plano de carpinterías hasta los 2.9 m hacia el interior. El resto de la estancia logra una mayor estabilidad térmica a lo largo del día.³¹

El movimiento del aire se produce de manera longitudinal, desde el cerramiento hacia el fondo en la parte inferior e inversamente en la superior, aunque no alcanza velocidades superiores a los 0.13 m/s (inadvertido).

Durante el verano, el viento que cruza el edificio reduce la humedad relativa, extrae el aire caliente almacenado y mejora la sensación de confort térmico.

En el vestíbulo la distribución térmica horizontal concentra el aire caliente al oeste y el más frío al este, con una diferencia de 3.2°C. Esta variación es debida a la orientación del edificio³² y a los distintos grados de exposición de cada zona de la planta baja (figura 12).

³⁰ Según la escala de efectos sobre los seres humanos propuesta por Olgyay (1996: 20).

³¹ La zona de afección más directa del vidrio son los 0,5 m inmediatamente contiguos, denotándose la diferencia con respecto a la carpintería de madera con temperaturas de 1,7°C.

³² La planta de emplazamiento nos indica como al este sólo recibe radiación directa en las últimas horas de la mañana, mientras que la oeste lo hace desde medio día hasta casi la puesta sol.

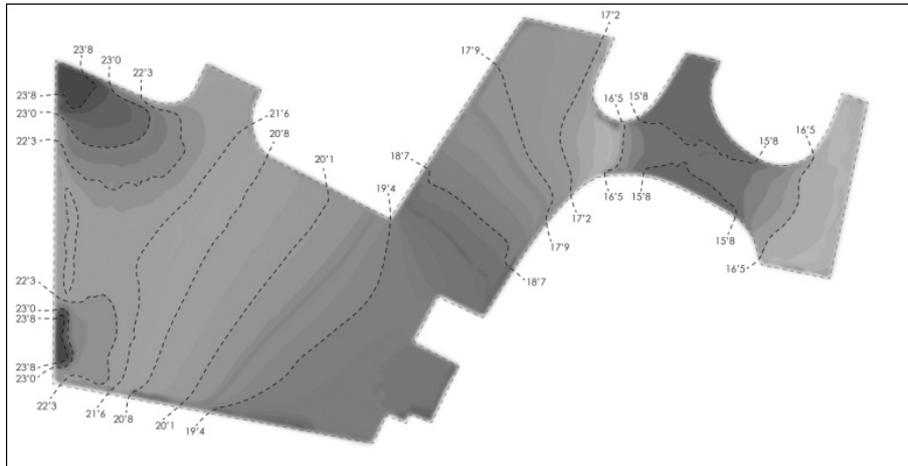


Figura 12. Distribución de temperaturas en el vestíbulo de planta baja durante el verano.

Las principales alteraciones del comportamiento general del aire provienen de la proximidad de los ventanales con menor aislamiento, así como del flujo exterior generado por los *aérateurs*. Como consecuencia del primer efecto, el aire situado inmediatamente detrás del vidrio presenta una temperatura 1.1°C inferior al resto de la estancia, prologándose este efecto en sólo 0.3 m. Por otra parte, el flujo de aire pasante a través de los *aérateurs* sube la temperatura 2.3°C aproximadamente en una franja lineal de longitud 1.3-1.5 m, llegando a velocidades máximas de 0.65 m/s (generalmente agradable).

En las monitorizaciones se observa que las condiciones formales de los *aérateurs*, su exposición al exterior y las direcciones de vientos dominantes, producen una mayor eficiencia de los situados en la zona sureste, que reducen la velocidad del viento a un 24.1%. Las restantes orientaciones tienen una menor eficiencia, con valores de 14.4% a noroeste, 9.1% a norte y 7.2% a sur³³.

Las diferencias de temperatura son más acentuadas en la parte oeste del vestíbulo, por lo que la estratificación vertical aumenta hasta los 1.5°C, mientras que en la zona este la diferencia es tan sólo de 0.4°C.

Al situar los *aérateurs* en fachadas opuestas, los proyectistas lograron forzar todo el flujo de ventilación del espacio en dirección sur-norte, según los vientos dominantes. El volumen de aire y la distancia entre compuertas provocan que la velocidad del aire sea baja, sin afectar

³³ Disminución de velocidad del aire provocada por los patios curvos que protegen la fachada donde incide el aire.

directamente al confort térmico, lo cual mantiene en paralelo el movimiento convectivo en vertical.

En las habitaciones el viento atraviesa los *aérateurs* con una media de 0.88 m/s (generalmente agradable), reduciéndose a 0.25 m/s (agradable) 4 m detrás. La menor superficie del hueco de salida y su ubicación centrada en el fondo de la habitación produce estancamientos del viento superior e inferiormente.

Niveles lumínicos y autonomía de luz solar

Los dos mecanismos de control de la radiación solar establecidos son también reguladores de la iluminancia interior. Por ello, el análisis de los espacios situados tras el *pan de verre ondulatoire* y el *brise-soleil* permite conocer cómo alteran y delimitan el uso interior.

A pesar de su orientación principal a poniente y de la sombra proyectada por el bloque, el vestíbulo presenta una franja de iluminación natural³⁴ completamente operativa por encima de los 300 lux durante todo el año. En el solsticio de invierno³⁵ con cielo nublado, ninguna otra parte de este espacio consigue ese margen mínimo funcional.

En los equinoccios³⁶, la práctica totalidad del espacio superó los 300 lux a lo largo de todo el día. La orientación produce una asimetría lumínica entre mañana y tarde con niveles medios entre 3-4.5 veces superiores a los de la mañana. La reflectividad del pavimento y el alto índice de contraste entre los paramentos interiores con el exterior provoca riesgo de deslumbramiento, especialmente con sol de poniente³⁷.

En el solsticio de verano³⁸, el comportamiento del espacio es semejante al anterior pero con niveles durante la mañana 1.6 veces superiores a los de invierno, mientras que por la tarde esa diferencia se reduce a 1.1 veces, salvo en casos puntuales.

³⁴ Según la Comisión Internacional de Iluminación (CIE) un espacio se subdivide en tres franjas iguales desde la ventana hacia el interior: iluminación natural, iluminación mixta e iluminación artificial.

³⁵ Del 21 al 23 de diciembre, amanece a las 7:50 y anochece a las 15:40, considerando unas condiciones de cielo nublado todo el tiempo.

³⁶ Del 20 al 21 de marzo y del 22 al 23 de septiembre, amanece a las 5:59 y anochece a las 17:56.

³⁷ Se incrementa el riesgo cuando la relación entre iluminancias de la zona de trabajo y alrededores es superior a 1:3 sin espacios de transición (Yáñez, 2008: 441).

³⁸ Del 21 al 23 de junio, amanece a las 4:07 y anochece a las 19:07, llegando el sol a su máxima altura a las 12:07.

Aunque la indefinición de los usos del vestíbulo no permita acogerse a limitaciones de nivel definidas en la normativa, se ha marcado un mínimo de 300 lux por tratarse de una zona pública de paso y relación. En este sentido la autonomía del 80% se consigue hasta los 4.6 m desde el sur y los 6.0 m desde el oeste. Este valor baja 3.5 m hacia el interior al 70% y el resto del espacio, al quedar debajo del bloque, sólo consigue valores del 50-60%.

Los dos análisis realizados indican que el *pan de verre ondulatoire* protege levemente de la radiación solar de poniente, aunque su formalización vertical ayuda a mitigar la entrada de luz directa en exceso.

Las habitaciones presentan su banda de iluminación natural por encima de los 300 lux todo el año³⁹. En el solsticio de invierno las otras dos zonas no superan el nivel funcional mínimo, ya que permanecen con una relación fija de 1.00-0.28-0.16 debida al funcionamiento exclusivo con radiación difusa.

Durante los equinoccios, de 9:00 a 13:00 todo el espacio está por encima de los 300 lux, reduciéndose progresivamente desde medio día hasta el atardecer ya que no recibe radiación directa desde las 13:30.

En el solsticio de verano, el periodo de mayor iluminancia se reduce de 9:00 a 11:00 debido a la altura solar, momento desde el cual el nivel mínimo deja de alcanzarse en las zonas más profundas.

La autonomía en los primeros 2.0 m es del 80%, 1.4 m al interior baja al 70% y desde este punto desciende gradualmente hasta llegar al 50% en la zona de aseo.

³⁹ Salvo en las horas más próximas al amanecer y el atardecer en invierno.

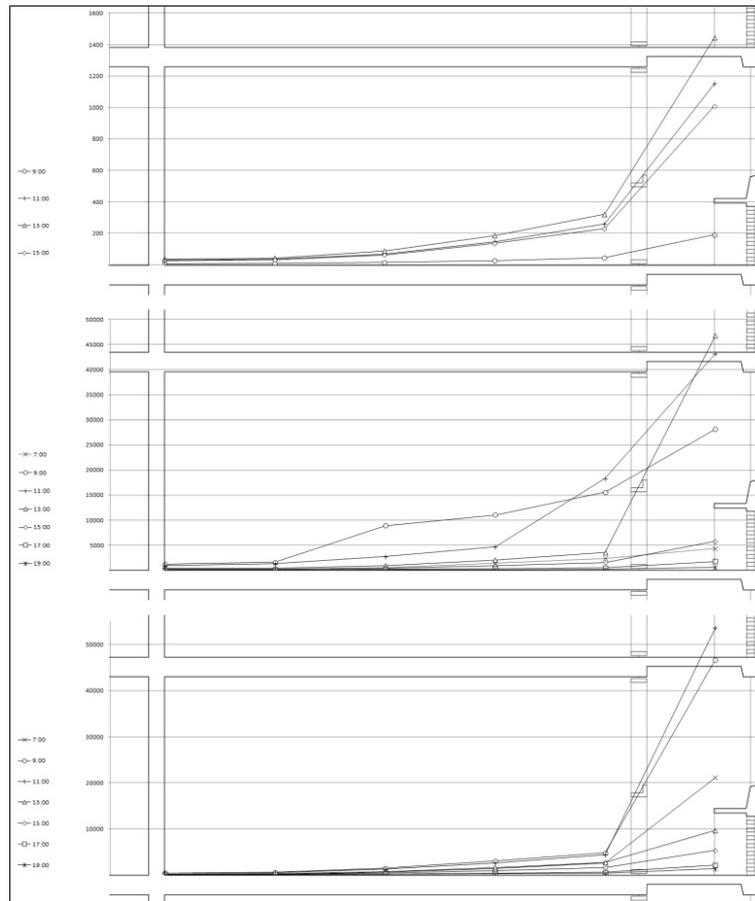


Figura 13. Sección transversal con niveles lumínicos durante el día. Solsticio de invierno, equinoccio y solsticio de verano.

Tanto monitorización como simulación, demuestran que el *brise-soleil* aumenta su efectividad a lo largo de la mañana y regula la entrada de radiación con el cambio de estaciones invierno-verano⁴⁰. En el periodo frío el *brise-soleil* reduce la iluminancia exterior entre 39%-68% desde el amanecer hasta medio día, mientras que se produce un descenso del 50%-32% por la tarde. En el verano, el rendimiento lumínico por la mañana varía del 57%-73% y con el transcurso de la tarde cambia del 40%-8%.

4. DISCUSIÓN

La comparación de los resultados obtenidos con otras obras de Le Corbusier analizadas y con estudios higrotérmicos de otros autores, permiten encuadrar la investigación. Para ello se cruzan los datos según la relación con el lugar, el funcionamiento higrotérmico, la permeabilidad al viento y el control lumínico.

⁴⁰ Las medidas están tomadas 1.00 m al exterior del *brise-soleil* y justo delante del plano de las carpinterías, es decir, 1.47 m al interior con respecto a la fachada.

4.1. Lugar y clima

La huella física del edificio sobre el medio en que se emplaza aparece aquí como una decisión principal de Le Corbusier en los primeros estadios del proyecto. Los estudios muestran cómo, a pesar de las imposiciones urbanísticas, el bloque principal terminó desvinculándose de las alineaciones prefijadas para buscar una orientación más próxima al óptimo según los estudios.

En este caso, el conocimiento de los efectos de la radiación solar le condujo a modificar el proyecto original de Lucio Costa con la implementación del *brise-soleil*, en respuesta al soleamiento de la fachada sureste. Los problemas de altas temperaturas interiores surgidos en obras previas con fachadas de vidrio, como la *Cité de Refuge* (París, 1929) o el *Pabellón Suizo* (París, 1931), fueron testimonio de la necesidad de este recurso.

4.2. Temperatura y construcción

La compacidad de la forma elegida por Lucio Costa originalmente, y respetada por Le Corbusier, reduce el intercambio con el exterior y favorece la conservación de la energía en el interior (captada o producida). Sin embargo, dado que los criterios energéticos en arquitectura son parte del pensamiento contemporáneo, es más plausible atribuir este mérito a los condicionantes urbanísticos, la racionalidad constructiva o el imaginario formal de los arquitectos.

El *brise-soleil*, configurado en base a las trayectorias solares determinadas en la carta solar de París, presenta una proporción idónea ante el control de los efectos primarios del soleamiento, ajustándose a los requerimientos del clima. No ocurre igual con el *pan de verre ondulatoire*, cuyo valor plástico y representativo queda por encima de cualquier otra justificación técnica respecto al soleamiento.

Sin embargo, el volumen de hormigón que compone los elementos del *brise-soleil*, expuesto directamente al Sol, convierte al entramado en un captador de energía calorífica. El control de esta masa térmica ha sido fuente de problemas de habitabilidad por exceso de acumulación de energía y su posterior cesión al interior. De manera especial ocurre en aquellas obras donde el *brise-soleil* fue construido como prolongación de los elementos

interiores de estructura, lo cual establece una continuidad que transmite el calor al interior por conducción y radiación.

Por el contrario, esta manera construir el *brise-soleil*, representativa de sus edificios residenciales en el entorno de Centroeuropa, mejora el funcionamiento térmico en invierno.

4.3. Permeabilidad e higrotermia

Los *aerateur* aparecen en los estudios, más que como compuertas de ventilación independientes, como un sistema en conjunto capaz de aumentar la superficie de intercambio con el exterior y convertir las formas estancas en cuerpos permeables al viento (figura 14). Según las condiciones del clima y el programa, los *aerateur* proliferaban en los cerramientos, por lo que su máximo exponente se mostró en las condiciones tropicales de la India.



Figura 14. Dos *aerateur* de planta baja enfrentados en el *pan de verre ondulateur*. Estado actual.

La esbelta proporción del *aerateur*, unida a su prolongación a toda la altura libre interior, respondía a los estudios de Missenard durante sus colaboraciones con el *Atelier 35S* en los años 50. Los análisis muestran cómo produce un efecto de «lámina de aire»⁴¹ que mueve

⁴¹ Denominación del efecto creada por Missenard. Véase en el documento FLC P1-10-306 del Archivo Fondation Le Corbusier «Nota redirigida por Xenakis junto a la carta de Le Corbusier a Varma el 26 de Mayo de 1956».

las capas superiores e inferiores, a la vez aumentan su velocidad al pasar por la compuerta e induce el movimiento en la totalidad del espacio.

El funcionamiento en verano revela una planta baja con mejores condiciones de confort térmico que las habitaciones, a pesar de tener peor orientación y coeficiente volumétrico. La incapacidad de ventilar el calor interno del edificio por medio de ventilación cruzada, unido a la inercia térmica del *brise-soleil*, reduce la sensibilidad del bloque ante los cambios exteriores y mantiene una temperatura alta durante todo el día.

4.4. Luz, temperatura y función

La radiación solar tiene un peso fundamental sobre la respuesta térmica de un edificio a corto plazo, mientras que la temperatura ambiental lo tiene en el funcionamiento a largo plazo (Marincic & del Río, 2007). En consecuencia se generan dos subespacios lumínico-térmicos, los de alta frecuencia de cambio y los de baja frecuencia. Los primeros asociados a la radiación directa, con mayor amplitud térmica y lumínica, cuyo nivel de cambio depende de los fenómenos diarios exteriores. Los segundos, asociados a la radiación difusa y a la masa térmica, donde los cambios se producen en base a la evolución de los valores medios estacionales.

El punto de inflexión que separa los dos subespacios presenta una definición casi constante en las habitaciones, de manera que las mediciones térmicas y lumínicas lo sitúan aproximadamente 2.5 m detrás del vidrio. En el vestíbulo de planta baja la extensión de la franja tiene una mayor variabilidad debido a la asimetría de radiación solar a lo largo del día en orientación oeste.

La disposición original del mobiliario indicaba una vinculación del uso con las zonas lumínico-térmicas. El espacio con mejor iluminación natural, temperatura confortable durante el día y posibilidad de ventilación, acogía la zona de estudio. Al contrario, los espacios con mayor estabilidad térmica y menor nivel lumínico fueron destinados al descanso y el aseo (figura 15). Estas zonas quedaron reflejadas en la elección de los colores del techo: estudio (blanco), descanso (rojo) y aseo (verde).



Figura 15. Habitación tipo con mobiliario original. Estado actual.

De igual modo, la elección de los colores del *brise-soleil* sureste muestran un criterio general flexible en el cual predominan techos en colores luminosos (blanco, amarillo o azul), combinados con dos elementos verticales, uno en tono semejante al techo y otro en tonos oscuros (rojo o verde). La absorción de los muros ayuda a controlar los deslumbramientos exteriores y los techos claros mejoran la iluminación indirecta interior.

4.5. Estado actual de la Casa de Brasil

El edificio de la *Casa de Brasil* conserva la función original para la que fue concebido. Tras treinta años de gestión francesa, el estado de ruina inminente obligó a realizar una profunda rehabilitación en los años 1997-2000 (Brum, 2009).

Las obras estuvieron orientadas a la consolidación estructural, mejora de aislamientos acústicos y puesta al día en instalaciones y servicios. También se amplió el programa original con la modificación del reparto de habitaciones y la adición de nuevas estancias a fachada noroeste en espacios no proyectados para ello.

Debido a los puentes acústicos internos y externos producidos por el sistema de los *aérateurs*, fueron sustituidos por válvulas de admisión de aire justificadas desde la normativa

de ventilación higiénica. De este modo se terminaron de coartar las opciones de evacuación del calor acumulado en el interior, por lo cual el bloque se convirtió en un mecanismo térmico capaz de captar energía pero incapaz de cederla para enfriarse cuando era preciso⁴².

El presente análisis pone en evidencia la necesidad de establecer un nuevo enfoque patrimonial para la Arquitectura Moderna, que por una parte supere los clásicos criterios de intervención formal-plásticos, y por la otra trascienda la incompreensión de la obra en su conjunto. Se evitarían así actuaciones que, aunque preservan la apariencia exterior, anulan valores esenciales que dificultan su habitabilidad.

Del mismo modo que cualquier intervención en el patrimonio asume la peritación de estabilidad estructural o constructiva, la necesaria prolongación de la habitabilidad de la Arquitectura Moderna, exige la inclusión de las metodologías de análisis energético como punto esencial para su duración (Calduch, 2009).

5. CONCLUSIÓN

Evaluar la obra de un arquitecto desarrollada en unas coordenadas socioculturales distintas de los actuales criterios de ecología y sostenibilidad, exige construir puentes conceptuales comunes que eviten conclusiones anacrónicas o evidentes. En concreto, la arquitectura de mitad del s. XX mantuvo una relación directa con el clima y el lugar a nivel proyectivo y constructivo. Es en este contexto en el cual la obra de Le Corbusier se aproximó a la actual idea de sostenibilidad.

En primera instancia, la eficacia del *brise-soleil* como protección del soleamiento aparece como una cuestión puramente geométrica, basada en el empleo de las cartas solares para la formalización. En este caso, la relación profundidad/altura de 1:1.8 y anchura/altura de 1:1.7 orientada con azimut 120°, consigue un coeficiente de sombra de 93.5° en verano y

⁴² Este funcionamiento obliga a los residentes a mantener las puertas interiores y exteriores abiertas en verano, de modo que el problema acústico sigue sin quedar resuelto.

76.3° en invierno, además de una autonomía de luz solar media del 68% con un máximo del 80% tras el vidrio.

La inercia térmica conseguida por la forma y el sistema constructivo, conserva una temperatura estable en los espacios interiores, dado que las oscilaciones sólo se transmiten una media del 37.0% en planta baja y del 26.0% en el bloque de habitaciones.

En la estructura del *brise-soleil*, esta inercia provoca un doble efecto. Por una parte, consigue que disponga de un coeficiente de estabilidad térmica de 0.93, lo cual denota su capacidad de amortiguación de la onda térmica exterior. Por la otra, el exceso de energía acumulada en verano transmitido al interior a través de la estructura, dificulta el confort térmico por la elevada temperatura.

En definitiva, mediante el *brise-soleil*, Le Corbusier puso en valor los espacios intermedios interior-exterior, presentes en toda la historia de la arquitectura, pero cuyo indefinido carácter constituyó el germen de su eliminación desde una lógica optimizadora.

Los *aérateurs* presentan una proporción anchura/altura variable entre 1:12 y 1:16. Esta esbeltez mantiene una superficie expuesta reducida (0.37 m^2 - 0.50 m^2), lo que consigue una elevada velocidad del viento al atravesarlo y genera una zona de afección posterior de 1.5 a 4.0 m. Por lo tanto, el beneficio sobre el confort térmico de la ventilación en grandes volúmenes de aire, sólo proviene de la renovación, reducción de humedad relativa y disipación de calor acumulado, mientras que en espacios más acotados se añade la mejora provocada por la brisa directa.

Le Corbusier interpretó la forma arquitectónica como mecanismo eficaz para regular las condiciones climáticas y construir un ambiente interior confortable, sin generar dependencia de los recursos tecnológicos. El desarrollo de un prototipo inicial como la *Unité d'Habitation*, puesto en carga en numerosos emplazamientos, le permitió depurarlo hasta llegar a soluciones como la *Casa de Brasil* o el *Convento de la Tourette*.

Los ensayos realizados muestran una arquitectura capaz de: controlar la radiación solar en orientaciones perjudiciales; emplear la inercia térmica para reducir el impacto de la onda

térmica exterior; gestionar la permeabilidad al aire según las condiciones exteriores; acercarse al confort higrotérmico y lumínico en los espacios interiores.

Los resultados obtenidos muestran la necesidad de superar visiones sesgadas, anacrónicas o carentes de soporte científico, pero también de evitar el fundamentalismo plástico o histórico que rodea la obra del arquitecto suizo. Conocer con objetividad el patrimonio construido desde una perspectiva energética, constituye el origen de una arquitectura vinculada al medio ambiente, al usuario y verdaderamente sostenible.

Agradecimientos

Fondation Le Corbusier. Maison du Brésil de París. Proyecto MES INNPACTO del Plan Nacional de I+D+i del Ministerio de Ciencia e Innovación, financiado con fondos FEDER.

Bibliografía

Ábalos, I. (2001). *La buena vida: visita guiada a las casas de la modernidad*. Barcelona: Gustavo Gili.

ASHRAE. (2007). *Standard 62.1-2007 Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality. Indoor Air*. Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers.

ASHRAE. (2009). *ASHRAE Fundamentals Handbook*. Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers ASHRAE.

Atif, M. R., Love, J. A., & Littlefair, P. (1997). *Daylighting Monitoring Protocols & Procedures for Buildings*. International Energy Agency IEA.

Belgian Building Research Institute & Sulzer Infra Laboratory (1998). *NatVent Programme. Detailed Monitoring Protocol*. The European Commission.

Brum, C. K. (2009). «Maison du Brésil. A Brazilian territory in Paris». *Vibrant*, 6 (1), pp. 91-122.

Calduch Cervera, J. (2003). *La arquitectura moderna nacional. De 1927 a 1935: la crisis del internacionalismo*. Alicante: Universidad de Alicante.

Calduch Cervera, J. (2009). El declive de la arquitectura moderna: deterioro, obsolescencia y ruina. *Palapa*, 4 (2), 29-43.

Colomina, B. (1994). *Privacy and Publicity: Modern Architecture as Mass Media*. Cambridge: The MIT Press.

DesignBuilder Software. (2010). DesignBuilder (Version 2.3) [software]. Stroud: DesignBuilder Software Ltd.

Etheridge, D. (1996). *Building Ventilation. Theory and Measurement*. Chichester: John Wiley & Sons Ltd.

Givoni, B. (1981). *Man, Climate and Architecture*. Amsterdam: Elsevier.

ISO 7726:1998 Ergonomics of the thermal environment. Instruments for measuring physical quantities. Ginebra: International Organization for Standardization.

ISO 7730:2005 Ergonomics of the thermal environment. Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria. Ginebra: International Organization for Standardization.

Le Corbusier (1946). *Oeuvre complète 1938-1946*. Zurich: Les Éditions d'Architecture.

Le Corbusier. (1957). *Oeuvre complète 1952-1957*. Zurich: Les Éditions d'Architecture.

Le Corbusier (1998). *Hacia una arquitectura*. Buenos Aires: Poseidón.

Liggett, R. & Milne, M. (2010). *Climate Consultant (Versión 3.1)* [software]. Los Angeles: University of California Los Angeles.

Marincic, I., & del Río, A. (2007). «El tiempo como factor de diseño arquitectónico». *Palapa*, 2 (1), p. 35-43.

Missenard, A. (1937). *L'Homme et le climat*. Paris: Librairie Plon.

Neila González, F.J. (2004). *Arquitectura bioclimática en un entorno sostenible*. Madrid: Munilla-Lería.

Olgay, V. (1998). *Arquitectura y Clima. Manual de diseño bioclimático para arquitectos y urbanistas*. Barcelona: Gustavo Gili. [Ed. original: (1963) *Design with climate. Bioclimatic approach to architectural regionalism*. New York: Van Nostrand Reinhold].

- Requena Ruiz, I. (2011). *Arquitectura adaptada al clima en el movimiento moderno: Le Corbusier (1930-1960)*. Tesis doctoral, Universidad de Alicante.
- Siret, D. (2004). «Généalogie du brise-soleil dans l'oeuvre de Le Corbusier: Carthage, Marseille, Chandigarh». *Cahiers thématiques*, 4.
- Siret, D. (2006). «Etudes de l'Ensoleillement, 1940 - Grille climatique, 1951, Chandigarh - Ensoleillement, 1951, Chandigarh». *Le Corbusier Plans*. Paris: Editions Echelle-1 y Fondation Le Corbusier [DVD-ROM].
- Square One Research, Ltd. & Marsh, A. (2010). *Ecotect Analysis 2010 (Versión 2009)* [software]. San Rafael: Autodesk, Inc.
- Torres Cueco, J. (2004). *Le Corbusier: Visiones de la técnica en cinco tiempos*. Barcelona: Fundación Caja de Arquitectos.
- Yáñez Parareda, G. (2008). *Arquitectura solar e iluminación natural. Conceptos, métodos y ejemplos*. Madrid: Munilla-Lería.