



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA



Instituto  
Ingeniería  
Energética



ESCUELA TÉCNICA  
SUPERIOR INGENIEROS  
INDUSTRIALES VALENCIA

**TRABAJO FIN DE MÁSTER**  
**TECNOLOGÍA ENERGÉTICA PARA DESARROLLO SOSTENIBLE**

**“EVALUACIÓN DEL IMPACTO DE  
ESTRATEGIAS “NBS” EN EL CONSUMO  
ENERGÉTICO DE EDIFICIOS.  
APLICACIÓN A LA CIUDAD DE  
VALENCIA”**

**AUTOR:** Miguel Beato Pérez

**TUTOR:** David Alfonso Solar

**Curso Académico: 2018-19**

**“Fecha 09/2019”**



# **AGRADECIMIENTOS**

“A mi familia

A mi tutor

A mis compañeros”

# RESUMEN

El presente Trabajo Fin de Máster permitirá aplicar los conocimientos adquiridos en el Máster Universitario en Tecnologías Energéticas para el Desarrollo Sostenible, así como afianzar lo aprendido en el Grado en Ingeniería de la Energía.

El proyecto tratará el análisis del impacto de Soluciones Basadas en la Naturaleza (NBS) sobre el consumo energético de los edificios, mediante el empleo de un software de simulación energética de edificios en el cual se modificarán aspectos como la caracterización constructiva del edificio, el análisis del efecto de las sombras, la caracterización de equipos de climatización, iluminación... y la introducción de horarios de usos y temperaturas de confort. Estudiándose la calibración de los datos del proyecto mediante las medidas experimentales de la temperatura exterior de la superficie de los muros.

De tal forma, se evaluará a partir de un caso base el efecto del arbolado circundante al edificio y/o el efecto de un muro vegetal, presentando una especial atención al uso de diferentes tipologías de vegetación para seleccionar la mejor opción, además de diferentes medidas de mejora que hayan sido identificadas fruto de la simulación energética del edificio

**Palabras Clave:** Simulación energética de edificios, Soluciones Basadas en la Naturaleza, fachada verde, eficiencia energética.

# RESUM

El present Treball de Final de Màster pot permetre aplicar els coneixements adquirits al Màster Universitari en Tecnologies Energètiques per al Desenvolupament Sostenible, així como refermar lo que s'ha après en el Grau en Enginyeria de l'Energia.

El projecte tractarà l'anàlisi de l'impacte de Solucions Basades en la Natura (NBS) sobre el consum energètic dels edificis, mitjançant l'ús d'un software de simulació energètica de edificis en el qual es modificaran aspectes com la caracterització constructiva de l'edifici, l'anàlisi de l'efecte de les ombres, la caracterització d'equips de climatització, il·luminació... i la introducció d'horaris d'ús i temperatures de confort. Estudiant el calibratge de les dades del projecte mitjançant la realització de mesures experimentals de la temperatura exterior de la superfície dels murs

De tal forma, s'avaluarà a partir d'un cas base l'efecte de l'arbrat circumdant a l'edifici i/o l'efecte d'un mur vegetal, presentant una especial atenció a l'ús de diferents tipologies de vegetació per seleccionar la millor opció, a més de diferents mesures de millora que hagin estat identificades fruit de la simulació energètica de l'edifici.

**Paraules clau:** Simulació energètica d'edificis, Solucions Basades en la Natura, façana verda, eficiència energètica.

# **ABSTRACT**

The present Master's thesis will allow to apply the knowledge gathered in the University Master in Energy Technologies for Sustainable Development, as well as strengthen everything learnt in the Energy Engineering Degree.

The project will deal with the analysis of Nature Based Solutions (NBS) on the energy consumption of buildings, through the use of an energy simulation software which will modify aspects like the constructive characterization of the building, the analysis of shading effects, characterization of air conditioning equipment, lighting... and the introduction of use schedules and comfort temperatures. Studying the calibration of the project data using the experimental measurements of the exterior's surface temperature of the building's walls.

In such a way, starting from a base case the effect of surrounding trees and/or the effect of a green wall will be evaluated, taking special attention on the use of different vegetation types to select the best option, in addition to several improvement measures that had been identified through the energy simulation of the building.

**Keywords:** Building Energy Simulation, Nature Based Solutions, Green Wall, Energy Efficiency

# ÍNDICE

## Contenido

<b>CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN</b> .....	1
1.1. ANTECEDENTES .....	1
1.2. OBJETIVO .....	8
1.3. MOTIVACIÓN .....	9
1.4. ESTRUCTURA DEL DOCUMENTO .....	10
<b>CAPÍTULO 2. DESARROLLO DEL PROYECTO</b> .....	11
2.1. EDIFICIO .....	11
2.2. SOFTWARE.....	16
2.3. SIMULACIÓN ENERGÉTICA DEL EDIFICIO.....	18
2.3.1. Introducción de la geometría del edificio .....	18
2.3.2. Simulación energética del caso base.....	28
2.3.3. Simulación del caso con sombreado natural.....	54
2.3.4. Calibración de la transmitancia de los árboles mediante medidas experimentales.....	56
2.3.5. Simulación del caso con muro verde.....	61
<b>CAPITULO 3. ANÁLISIS DE LA SIMULACIÓN</b> .....	73
3.1. EVALUACIÓN DEL IMPACTO DEL SOMBREADO NATURAL .....	73
3.2. EVALUACIÓN DEL IMPACTO DEL MURO VERDE.....	81
<b>CAPITULO 4. ACTUACIONES ADICIONALES</b> .....	93
4.1. ESTUDIO DE GREEN WALL EN TODOS LOS MUROS DEL AULA 13 .....	93
4.2. ESTUDIO DE GREEN WALL EN EL MURO NOROESTE DEL AULA 11 .....	95
4.3. ESTUDIO DE GREEN WALL EN EL MURO SURESTE DEL AULA 12.....	96
4.4. INSTALACIÓN DE UNA CUBIERTA VERDE .....	98

<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>102</b>
<b>PRESUPUESTO .....</b>	<b>104</b>
<b>ANEXO. HORARIOS COMPACTOS DE ENERGYPLUS.....</b>	<b>105</b>

# CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

## 1.1. ANTECEDENTES

En el presente proyecto, se busca llevar a cabo la simulación energética del Centro de Educación Infantil y Primaria Ciutat Artista Faller, con el fin de evaluar el efecto que las Soluciones Basadas en la Naturaleza (NBS) tienen sobre los consumos de climatización del propio edificio, así como la identificación de otras medidas de ahorro energético adicionales detectadas fruto de la simulación llevada a cabo en el presente proyecto.

De forma concreta, las Soluciones Basadas en la Naturaleza analizadas con mayor detalle incluyen tanto el efecto del sombreado aportado por el arbolado circundante, así como la repercusión sobre el ahorro energética que tendría la instalación de un muro vegetal o Green Wall, medida planificada para su implantación dentro del marco del proyecto europeo GrowGreen.

En primer lugar, se van a presentar los conceptos centrales del proyecto que recoge la presente memoria, comenzando por la presentación de forma más general, hasta llegar a un punto más concreto con respecto a los contenidos aquí presentes en el conjunto de las denominadas Soluciones Basadas en la Naturaleza.

Las **Soluciones Basadas en la Naturaleza** o **NBS** (Del inglés “Nature Based Solutions”), surgen como una respuesta a ciertos desafíos de gran incidencia dadas las circunstancias actuales, tales como la urbanización insostenible con los problemas de salud humana que esta tiene asociados, la degradación y pérdida tanto del capital natural como de los servicios de los cuales nos provee el ecosistema tales como lo son el aire, agua o suelo; el cambio climático y el alarmante crecimiento de riesgos derivados de desastres naturales.

En la actualidad, se está incrementando notablemente el reconocimiento y la concienciación de las capacidades que la naturaleza presenta para poder ayudar a proveer de soluciones viables que empleen y desplieguen las propiedades de los ecosistemas naturales y de los servicios que estos proveen de una forma inteligente. Estas soluciones basadas en la naturaleza proveen de alternativas multipropósito, sostenibles, rentables y flexibles para varios objetivos. Este tipo de soluciones además tienen la función de colaborar con la creación de empleo y el crecimiento económico a través de la manufactura y envío de nuevos productos y servicios, los cuales sean capaces de mejorar el capital natural en lugar de consumirlo.

A la hora de encuadrar las diferentes Soluciones Basadas en la Naturaleza y considerar sus aplicaciones es útil pensar en estas como si se tratase de un concepto capaz de cubrir un gran rango de

acercamientos relacionados con el ecosistema, de los cuales todos ellos lidian con problemas ampliamente presentes en la sociedad actual. Para ello se presente una lista a modo de resumen de las diferentes NBS más extendidas de forma generalizada:

- Restauración de ecosistemas
  - Restauración ecológica
  - Ingeniería ecológica
  - Restauración de paisaje forestal
- Aspectos particulares de ecosistemas
  - Adaptación basada en ecosistemas
  - Mitigación basada en ecosistemas
  - Servicios de adaptación climática
  - Reducción de riesgos de desastres basada en ecosistemas
- Acercamientos relacionados con las infraestructuras
  - Infraestructuras naturales
  - Infraestructuras verdes
- Gestión basada en ecosistemas
  - Gestión integrada de zona costera
  - Gestión integrada de recursos hídricos
- Protección de ecosistemas
  - Conservación de áreas protegidas incluyendo la gestión de estas.

Como se observa en la lista, las actuaciones más adecuadas para la reducción del consumo energético en edificios, y aquellas capaces de ser evaluadas gracias a la simulación energética de los mismos, son los acercamientos relacionados con las infraestructuras. En el caso que atañe este proyecto, y dado que su implantación ha sido prevista como parte del proyecto europeo GrowGreen, resulta de especial interés el estudio del efecto sobre la eficiencia energética del centro escolar estudiado de medidas de infraestructuras verdes, como es el caso de la Green Wall a instalar en el edificio estudiado.

Los **muros verdes**, también conocidos como jardines verticales o Green Walls, son paneles de plantas cultivados verticalmente usando hidropónicos en estructuras que pueden estar o bien de pie o unidas a las paredes. Estos muros verdes están conformados por plantas insertadas en un medio de cultivo hecho de tal forma que el uso de espacio horizontal empleado sea el mínimo.

La forma de construcción de estos muros verdes, resulta similar a la manera de la que se hacen los muros tradicionales. Para ello se construye el esqueleto de la estructura sobre el cual se cuelgan las secciones que contendrán las plantas y flores que formarán parte del jardín vertical. Con respecto al método de regadío de las plantas, se encuentran algunas tipologías que incluyen tuberías ocultas para su riego mientras que otras instalaciones con un acceso más accesible requieren de ser regadas a mano.

Estos muros verdes tienen unas claras ventajas medioambientales debido a la propia naturaleza vegetal de los mismos. Las plantas son capaces de mejorar la limpieza del aire, debido a su capacidad para reducir la concentración de dióxido de carbono en el ambiente a la par que proporcionan oxígeno, realizando estos beneficios de forma simultánea a la absorción y limpieza el aire de polución; siendo este comportamiento de vital importancia en los espacios entre grandes edificios debido a la mayor

concentración de contaminantes en estas zonas, tales como dióxido de nitrógeno que aquí se propicia con mayor asiduidad.

Continuando con la lista de beneficios asociados a este tipo de construcciones sostenibles, los jardines verticales ayudan a paliar el efecto que conllevan los cambios de temperatura adversos sobre los materiales de los edificios, los cuales propician una dilatación y contracción de los propios materiales, fenómeno el cual se traduce en un agrietamiento y deterioro acelerado de la estructura pudiéndose incluso producir fisuras. No solo eso, sino que estos muros vegetales también aportan beneficios tales como la redirección del agua de lluvia fuera de las paredes durante periodos de precipitaciones intensas, así como la protección frente a los rayos UVA, los cuales contribuyen al deterioro de las características superficiales de los muros afectados.

Pero el beneficio más relevante de los muros verdes dentro del contexto de este proyecto se trata de la capacidad que estos tienen para lograr una reducción del consumo energético de los edificios en los que estos se instalan. De tal forma, los muros vegetales son capaces de paliar en cierta medida los efectos del denominado “efecto isla”, el cual se da generalizadamente en los núcleos urbanos y contribuye con el aumento de emisiones y del grado de polución del aire, al mismo tiempo que provoca que las temperaturas en estos sean considerablemente superiores en comparación a las de las zonas rurales a lo largo de todo el año, lo cual se traduce en demandas energéticas superiores durante los meses de verano.

De esta forma, los muros verdes consiguen aliviar esta problemática actuando como un elemento de sombra frente a los efectos directos de la radiación solar. Adicionalmente, a diferencia de otros tipos de materiales empleados de forma tradicional en la construcción, como es el caso de los ladrillos o el cemento, las plantas no almacenan toda la energía solar, sino que la reflejan en gran parte. De tal forma, estos muros consiguen lograr un enfriamiento del aire exterior en verano mediante un proceso de evapotranspiración, reduciendo las necesidades de refrigeración, al mismo tiempo que la vegetación realiza el efecto de capa aislante reduciendo los costes energéticos de calentar el interior de las viviendas durante los meses de invierno.

Para llevar a cabo un aprovechamiento satisfactorio de estos beneficios, es necesario seleccionar las plantas correctas para cada aplicación, debiendo ser estas adecuadas en función del proyecto llevado a cabo. De tal forma las plantas empleadas para los muros vegetales instalados en el exterior deben de ser seleccionadas expresamente en función de la zona climática. Dentro de esta preselección se han de identificar las especies de planta capaces de funcionar de forma adecuada en muros verdes, contando con un amplio rango de tolerancias de forma que presenten un periodo de gracia que favorezca su adaptación de forma satisfactoria a su entorno. He ahí la importancia de planificar un mantenimiento estricto de estos muros al menos durante los primeros meses, siendo estos el periodo más crítico donde se hace patente tener una metodología de irrigación bien definida y temporizada.

Todos estos beneficios resultan altamente importantes dentro del desarrollo sostenible de las áreas urbanizadas a lo largo del planeta, es por ello por lo que la instalación del muro verde analizado en este proyecto, así como otras medidas adicionales planificadas dentro del núcleo urbano de los barrios de Benicalap y Ciutat Artista Faller, están recogidos dentro del marco del proyecto europeo GrowGreen.

**El proyecto GrowGreen** aspira a crear ciudades saludables y resistentes a los efectos adversos de la climatología y las precipitaciones mediante la inversión en Soluciones Basadas en la Naturaleza (NBS). De forma que, mediante la inclusión de la propia naturaleza como parte del entorno urbano viviente, se consiga una mejora en la calidad de vida para todos los ciudadanos, consiguiendo unas mejoras socioeconómicas para la comunidad. Espacios verdes de gran calidad y vías acuáticas proveen de soluciones innovadoras e inspiradoras para enfrentarse a los mayores desafíos a los que se exponen los entornos urbanos como es el caso de las inundaciones, estrés térmico, sequías, mala calidad del aire y pérdida progresiva de la biodiversidad.

Al implementar Soluciones Basadas en la Naturaleza en la planificación, desarrollo y administración de áreas urbanas a largo plazo, se consiguen espacios naturales accesibles los cuales conforman un aspecto permanente de todas las áreas urbanas a lo largo del mundo, creando armonía entre la gente, la economía y el medioambiente para un mayor beneficio conjunto.

GrowGreen se trata de un proyecto de 5 años con los siguientes objetivos en mente:

- Contribución al conocimiento colectivo sobre Soluciones Basadas en la Naturaleza en ciudades para obtener medios rentables y replicables de incrementar la resistencia urbana a climatologías adversas. Evaluando los beneficios medioambientales y económicos para sustentar el desarrollo de políticas basadas en la naturaleza y promover un mercado global para este tipo de soluciones
- Desarrollo de un acercamiento reproducible y de fácil uso para el apoyo de la concepción e implementación de NBS estratégicas en ciudades alineando estas soluciones con las prioridades existentes de cada urbe.
- Apoyo a la creación de las condiciones requeridas para dar soporte, canalizar y permitir la implantación de NBS en ciudades, llevadas a cabo mediante la concienciación y construcción de medios en ciudades a lo largo del globo. De tal forma, se apoyará el desarrollo del marco legislativo requerido y los modelos financieros necesarios para invertir en Soluciones Basadas en la Naturaleza.

Mediante la materialización de proyectos de NBS y colaboraciones con un grupo de ciudades a lo largo de Europa y China, GrowGreen será capaz de desarrollar un acercamiento replicable al desarrollo e implementación de estrategias basadas en la naturaleza a nivel urbano. Siete ciudades son partícipes formales del proyecto GrowGreen teniendo todas ellas en común desafíos complejos asociados con la resiliencia al clima además de un espectro de problemas sociales, económicos y medioambientales.

Para ello, se están diseñando e implementando proyectos demostrativos en cuatro ciudades pioneras: Manchester (Reino Unido), Valencia (España), Wroclaw (Polonia) y Wuhan (China). Esta última ciudad, Wuhan, es una ciudad la cual se está desarrollando rápidamente y que forma parte de la fase piloto del Programa de Ciudades-Esponja Chino. Las ciudades pioneras europeas están emparejadas a su vez con ciudades discípulo: Brest (Francia), Zadar (Croacia) y Módena (Italia). De forma que las ciudades con las que están emparejadas se enfrenten a riesgos climáticos similares.

En el caso de la ciudad de Valencia, esta está conectada con la ciudad croata de Zadar, dado que ambas ciudades presentan principalmente riesgos asociados a la gestión frente a elevadas temperaturas y algunos riesgos debidos al agua. Cada ciudad trabajará con su ciudad emparejada lo cual contribuirá a

un incremento de la capacidad y experiencia para desarrollar e implementar estrategias basadas en la naturaleza aplicadas en ambas ciudades.

Enfocando en el caso específico de Valencia, esta ciudad se ubica en el centro de la línea costera de la parte oriental de la Península Ibérica y se trata de la tercera ciudad más grande del territorio español desde el punto de vista demográfico y económico. Esta ciudad tiene un clima templado subtropical con veranos cálidos y poca lluvia a lo largo del año. Los análisis sobre el cambio climático en esta ciudad sugieren que el incremento de temperaturas, los fenómenos climatológicos extremos puntuales y el descenso de las precipitaciones registradas serán habituales durante lo que resta de siglo. El proyecto demostrativo de Soluciones Basadas en la Naturaleza para la ciudad levantina que pasa por remediar los riesgos existentes relacionados con el calor está localizado en el distrito de Benicalap – Ciudad Fallera, el cual presenta unos altos niveles de desempleo además de una población envejecida e infraestructuras en estado de deterioro.

El proyecto demostrativo en Valencia tiene fijado como meta reducir el estrés térmico y mejorar la conectividad entre espacios verdes en la ciudad, la costa y los paisajes rurales cercanos. Como parte del presente proyecto, los jardines urbanos tradicionales serán rehabilitados para crear oportunidades para implantar la agricultura urbana sostenible, incluyendo la producción de frutas y vegetales locales irrigados con aguas grises recicladas. Un pequeño bosque será desarrollado empleando especies nativas para incrementar la biodiversidad y conectividad ecológica además de poder administrar el agua de lluvia pudiéndola almacenar temporalmente. Otras acciones se llevarán a cabo usando especies vegetales apropiadas para mejorar aún más la conectividad ecológica y reducir el estrés térmico.

Para llevar a cabo los objetivos fijados por GrowGreen en los barrios de Benicalap y Ciutat Artista Faller, se llevarán a cabo actuaciones divididas en tres líneas de acción diferenciadas:

- En primer lugar, se va a llevar a cabo la construcción de dos ecosistemas en forma de jardín vertical en el Parque de Benicalap. Estando uno de los ecosistemas basado en plantas tradicionales con una forma de crecimiento hacia ascendente, mientras que el otro es de tipología pared verde y se riega desde la parte superior hacia la inferior. Para realizar la irrigación de estos jardines se emplearán aguas grises recicladas de lavabos y duchas de edificios cercanos y filtrados mediante NBS como es el caso del muro verde a instalar en el centro de educación infantil recogido en esta memoria. Ambos jardines verticales tendrán un seguimiento de su consumo, crecimiento y mantenimiento además de una aportación a la reducción de la temperatura ambiente.



Ilustración 1. Jardines verticales (GrowGreen, 2018)

- En otra línea se realizará la construcción de un pequeño bosque dedicado a compensar emisiones de CO<sub>2</sub>. Esta actuación se corresponde con una zona arbolada la cual hace un especial hincapié en la gestión sostenible del agua y la energía y que emplea materiales orgánicos reciclados y certificados para la fabricación de su nuevo mobiliario. Mediante este pequeño bosque se pretende realizar una conexión con las demás zonas verdes de las inmediaciones fomentando hábitats para la fauna local, además de disponer de un sistema de drenaje sostenible, el cual se encargará de recoger el agua y devolverla a un ritmo más lento.



Ilustración 2. Bosque urbano (GrowGreen 2018)

- Finalmente, la tercera actuación planificada a llevar a cabo se trata de la construcción de un corredor verde, que por definición se trata de una serie de zonas peatonales con una alta presencia de espacios verdes y jardines encargados de conectar con otras zonas verdes del vecindario. La meta principal con la que se planteó la puesta a punto de este tipo de estrategia basada en la naturaleza es la de mejorar las zonas públicas con una perspectiva sostenible y ecológica.



*Ilustración 3. Corredor verde (GrowGreen 2018)*

Para llevar a cabo estas actuaciones se ha planteado una línea temporal con los diferentes hitos que se esperan alcanzar mediante la consecución de este proyecto:

- 2017: Durante esta anualidad, tanto la ciudad pionera de Valencia, como su ciudad discípulo de Zadar, comenzarán codiseñando proyectos demostrativos de Soluciones Basadas en la Naturaleza con ciudadanos e inversores
- 2018: Se finalizan los diseños conjuntos para proyectos demostrativos y se comienzan los trabajos de construcción. Adicionalmente, se comienza a trabajar estrechamente con la ciudad discípulo para apoyar el desarrollo de sus estrategias de NBS.
- 2019: Se completa la construcción de los proyectos demostrativos en la ciudad pionera mientras que se continúa con el desarrollo de las Soluciones Basadas en la Naturaleza en la ciudad discípulo de Zadar.
- 2020: Comienza la monitorización y coadministración de los proyectos demostrativos.
- 2021: Se generan capacidades e intercambios de conocimientos entre Valencia y Zadar, además de extrapolar estos conocimientos entre nuevas ciudades de replicación

## 1.2. OBJETIVO

El objetivo del presente Trabajo de Final de Máster consiste en la evaluación del impacto que diferentes Soluciones Basadas en la Naturaleza presentan sobre el consumo energético del Centro de Educación Infantil y Primaria “Ciutat Artista Faller”, más concretamente al bloque dedicado a la enseñanza de los grupos de infantil.

Las medidas de ahorro energético derivadas de las NBS, algunas de ellas ya existentes en el entorno del centro educativo y otras previstas para su implantación en un futuro cercano, se estudiarán desde el punto de vista del impacto que estas tienen de forma directa sobre el consumo de los equipos de climatización recogidos en el edificio simulado.

De esta forma se podrá tener una serie de datos y resultados capaces de demostrar el impacto que las Soluciones Basadas en la Naturaleza tienen sobre la eficiencia energética en los edificios pudiéndose así evaluar su viabilidad técnico-económica como métodos fiables y sostenibles para limitar la demanda de climatización en diferentes construcciones, centrándose en primer lugar en su aspecto puramente energético para después valorar el impacto global de la solución implantada, haciendo balance con las otras bondades que esta presenta para paliar las diferentes problemáticas existentes en los núcleos urbanos no relacionadas estrictamente con la eficiencia energética.

Estas medidas de ahorro energético basadas en la naturaleza, especialmente el muro verde localizado en una pared exterior de una única aula, se pueden extrapolar de forma sencilla a otras áreas del edificio gracias al trabajo previo llevado a cabo para la simulación del mismo. De esta forma se podrá evaluar el efecto que podrían tener la implantación de elementos de sombra vegetales adicionales o la instalación de muros ajardinados en paredes de diferentes orientaciones del edificio, así como estudiar la posibilidad de implementar nuevas NBS diferentes a la inicialmente planificadas.

De forma complementaria, y debido a que para poder evaluar el efecto de las diferentes NBS existentes o planificadas en el edificio es necesario llevar a cabo una simulación energética en detalle del mismo, se ha decidido aprovechar la plétora de datos obtenidos en la simulación energética para poder identificar puntos de pérdida de energía importantes, pudiendo así proponer otras medidas de ahorro energético ajenas a las NBS pero que puedan resultar interesantes, pudiéndose observar el efecto de estas de forma rápida gracias al trabajo realizado previamente en la simulación.

### 1.3. MOTIVACIÓN

La motivación para llevar a cabo el presente proyecto pasa por el estudio y análisis de las posibilidades existentes para aminorar el consumo energético existente en el centro de educación infantil estudiado empleando Soluciones Basadas en la Naturaleza, teniendo estas una mayor incidencia sobre la fracción dedicada a la calefacción y refrigeración del propio edificio.

Este tipo de actuaciones resultan de especial importancia debido al incremento acelerado del consumo de energía primaria a escala global durante los últimos años, habiéndose incrementado este en cerca de un 62% en el periodo de 25 años comprendido entre 1989 y 2014, mostrando todavía en la actualidad una tendencia al alza siendo un elevado porcentaje de este consumo procedente de la quema de combustibles fósiles.

A nivel nacional, cerca del 12,5% de la energía consumida se corresponde al sector servicios, siendo el foco de consumo más importante la climatización de los edificios formando más de la mitad del consumo total asociado a estos.

Es debido al gran peso que tiene el consumo de climatización de las diferentes infraestructuras, combinado con el alarmante crecimiento de la demanda energética global, todo ello apoyado por un sistema de producción todavía ampliamente basado en los combustibles fósiles, lo que hace patente la necesidad de diseñar y actualizar el parque de edificios con medidas de ahorro energéticas que no se limiten tan solo a reducir la demanda energética de las construcciones a las que van asociadas, sino que además presenten un carácter sostenible adicional que les aporte un valor añadido capaz aportar una serie de beneficios adicionales capaces de limitar los efectos negativos que se dan lugar en los núcleos urbanos.

Para ello, es necesario llevar un estudio y promoción de las medidas de ahorro energético surgidas por parte de estrategias de Soluciones Basadas en la Naturaleza, las cuales no solo se limitan a reducir el consumo de los edificios, sino que ayudan a incrementar la biodiversidad urbana, mejorar la calidad del aire y reducir los efectos adversos del llamado “efecto isla” moderando las temperaturas entre una larga lista de beneficios añadidos.

De tal forma, la realización del presente proyecto ayudará a la creación de nuevo conocimiento asociado a la faceta energética de las NBS, de forma que la información relacionada con estas sea más accesible y visible de cara a un futuro donde este tipo de actuaciones dejen de ser proyectos aislados para formar parte la arquitectura y urbanismo de las ciudades a lo largo de todo el planeta.

#### **1.4. ESTRUCTURA DEL DOCUMENTO**

El desarrollo del proyecto se ve dividido en 5 fases separadas por diferentes hitos y caracterizadas por presentar tareas que se coordinan con una finalidad común. Para ello, se expone en los siguientes la estructura seguida en el presente documento para la realización del proyecto recogido en este desde la recopilación de datos del edificio hasta el análisis de los mismos con las conclusiones consecuentes a este.

En primer lugar, de forma previa a la simulación energética del edificio por medio del software empleado es necesario llevar a cabo una toma de datos in situ en bloque de educación infantil del CEIP “Ciutat Artista Faller” con el fin de recopilar datos sobre los parámetros más importantes para la simulación energética del edificio como es el caso de la composición de los huecos y cerramientos, ocupación o la presencia y potencia de aparatación eléctrica e iluminación.

Acto seguido, con los datos necesarios ya previamente recopilados se lleva a cabo la simulación energética como tal del edificio introduciendo su geometría y datos relevantes para el cálculo de las cargas térmicas dentro del software empleado para ello.

Una vez modelado el edificio base se procede a la creación de simulaciones adicionales con el arbolado circundante presente y/o el muro verde instalado, comparando estos casos entre sí y con el modelo base obtenido a término de la fase anterior. En esta fase resulta de gran importancia el diseño e introducción de la Green Wall dentro del software de simulación de forma que se emule de forma lo más fiel posible el efecto que estas NBS tienen sobre la demanda de climatización en el aula afectada.

En el caso del análisis del sombreado natural del edificio, se tienen instalados una serie de aparatos de medida los cuales permiten obtener los datos de temperatura de superficie del muro donde se instalará la Green Wall. Gracias a estas medidas, mediante la comparación de las temperaturas medidas con el montaje, y las obtenidas por la simulación del programa, se puede hacer un ajuste más realista de la evolución de la transmitancia de los árboles a lo largo del año hasta que ambos valores sean lo más próximos posible.

Alternativamente, aprovechando el hecho de haber realizado una simulación energética con gran lujo de detalle del edificio, se aprovecha la información recabada por el software de simulación para identificar nuevos puntos de mejora de consumo tanto asociados a la implantación o replicación de NBS, nuevas o ya existentes.

## **CAPÍTULO 2. DESARROLLO DEL PROYECTO**

### **2.1. EDIFICIO**

El edificio estudiado como parte del presente Trabajo de Final de Máster, se trata del Colegio de Enseñanza Infantil y Primaria “Ciutat Artista Faller” situado en el barrio homónimo. Este centro de enseñanza, fue construido en 1981 y no ha contado con ninguna reforma significativa desde entonces. El recinto escolar presenta una superficie gráfica de parcela de 6.628 m<sup>2</sup> y una superficie construida de 4.423 m<sup>2</sup>. El centro, además de dos edificios principales centrados respectivamente en la educación primaria e infantil cuenta con servicios adicionales tales como comedor, biblioteca, aula de informática, laboratorio, taller y dos pistas deportivas al aire libre enfocadas una de ellas para la práctica de varios deportes como fútbol/fútbol sala, balonmano, baloncesto...

En el caso que atañe este proyecto, el alcance de estudio de limita al bloque de educación infantil del centro, emplazamiento en el cual está prevista la instalación de una fachada ajardinada como parte de la iniciativa europea GrowGreen.

En el bloque estudiado se imparten clases a grupos de infantil (de 3 a 6 años). El centro imparte enseñanza tanto en castellano como en grupos centrados en el aprendizaje del valenciano. Además, se instruye en la enseñanza del inglés y de francés. El colegio tiene capacidad para alojar hasta 6 unidades de educación infantil repartidas en un total de 8 aulas, alcanzando así un valor máximo de 150 puestos escolares, manteniendo el ratio de 25 alumnos por clase presente también en las aulas de educación primaria.

Como anotación relevante, debido a la antigüedad y estado de las instalaciones del colegio, se han dado quejas por parte del profesorado y las asociaciones de padres sobre el estado de las mismas, pudiéndose identificar en las reclamaciones emitidas posibles mejoras en la eficiencia energética derivadas de la subsanación de estos defectos. Los casos más destacables se hace hincapié en el hecho de que las ventanas no son correderas y presentan una arista peligrosa para los niños, además de que los marcos de las mismas están hechos de hierro el cual además se haya altamente oxidado. Casos, que podrían solucionarse con el cambio de ventana por una más eficiente, con un vidrio de mejor calidad y carpintería de aluminio, que no solo conseguiría un entorno más seguro para los alumnos, sino que además reduciría en gran cantidad la demanda energética del edificio.

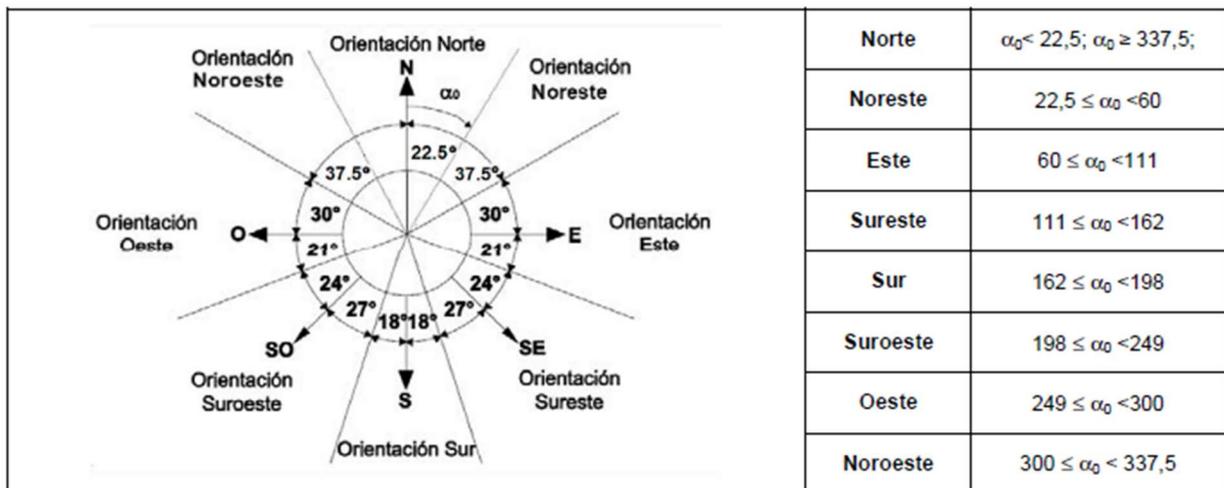


Ilustración 4. Orientaciones de las fachadas (IDAE, Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía, 2012)

En función de la figura A1 del DB-HE 1 del Código Técnico de la Edificación, referente a la orientación de las fachadas, esta se calcula en base al ángulo  $\alpha$  que se forma entre el norte geográfico con la normal de la fachada siguiendo un sentido horario. En función a este ángulo, y empleando la tabla facilitada por el CTE se puede determinar la orientación de la fachada en base a los ocho puntos cardinales.

En el caso que corresponde al presente proyecto, como se observa en la siguiente ilustración, la fachada inferior del edificio presenta un ángulo de  $142^\circ$  del norte geográfico con respecto a la normal de la fachada, lo cual se corresponde con una orientación sureste.



Ilustración 5. Ángulo de orientación del edificio

Al tener el edificio una forma rectangular con paredes paralelas entre sí, por correlación la orientación del resto de fachadas, la cual siguiendo en sentido horario partiendo de la fachada inferior es sureste, suroeste, noroeste y noreste, tal y como se indica en la siguiente imagen.



*Ilustración 6. Orientaciones de las fachadas*

Como se observa en las imágenes, el edificio tiene una planta rectangular con una longitud de 15 metros en las caras suroeste y noreste, y 25,5 metros de largo en las caras sureste y noroeste del bloque. El propio edificio cuenta con dos plantas de 3 metros de altura cada una en las cuales se alojan las diferentes aulas y espacios utilitarios del edificio. Este edificio se ubica en la parte situada más al oeste de la parcela que ocupa el CEIP "Ciutat Artista Faller", justo debajo del edificio principal dedicado a la enseñanza de los grupos de primaria, colindando en su cara sureste con las pistas deportivas y al noroeste y suroeste con el muro que delimita el espacio dedicado al centro de enseñanza con la vía pública.



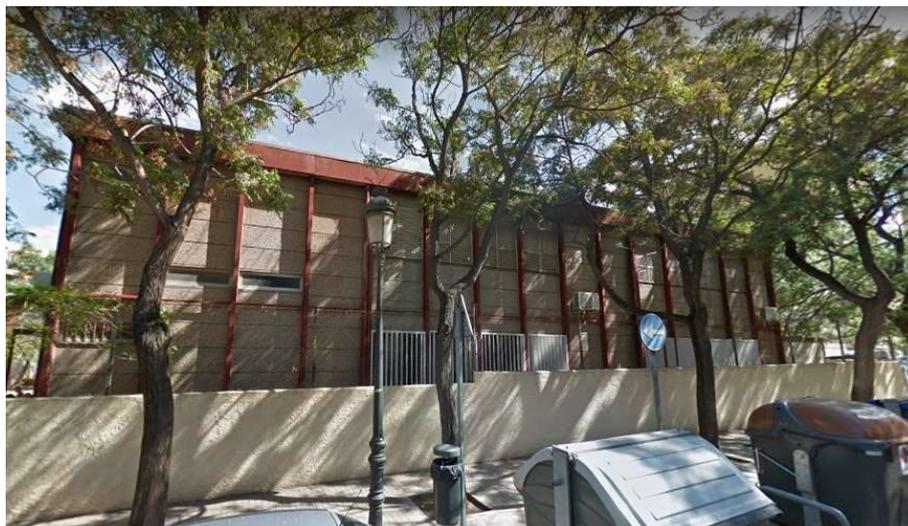
*Ilustración 7. Fachada noreste*

La única entrada al edificio se encuentra en la fachada noreste, esta fachada, una de las más castigadas térmicamente tiene la característica de comunicar únicamente con espacios no climatizados del edificio, por lo que las modificaciones sobre esta sección de la envolvente del edificio no presentan un gran impacto sobre su demanda de calefacción y refrigeración.



*Ilustración 8. Fachada sureste*

La cara sureste del edificio por otra parte, presenta una disposición que comunica con los aseos de ambas plantas, así como con dos aulas por planta de las ocho que presenta el edificio en su totalidad. La ubicación de estas aulas es fácilmente reconocible ya cada una de ellas presenta un bloque de cuatro ventanas anexas a las mismas. Esta vertiente edificio además presenta una hilera de árboles paralela a la misma, situados a una distancia de 8,5 metros.



*Ilustración 9. Fachada noroeste*

La cara noroeste, como se puede observar en la imagen superior, esta presenta una configuración muy similar a su equivalente paralela. En esta se siguen observando los cuatro grupos de cuatro ventanales los cuales comunican con las restantes aulas del edificio. En esta cara se tienen unas condiciones climatológicas más duras debido a su orientación, y a diferencia de la ya presentada fachada noreste, esta parte de la envolvente tiene conexión con zonas climatizadas del edificio.

Esta fachada, comunica directamente con la valla que separa la parcela del centro educativo con la calle, y presenta de forma equivalente al muro sureste una hilera de árboles que la sombrea situados a 4 metros del muro.



*Ilustración 10. Fachada suroeste*

Finalmente, el muro suroeste, a pesar de presentar tan solo tres ventanales los cuales comunican con áreas no ventiladas, la mayor parte de la fachada pertenece de forma directa a cuatro de las aulas del edificio. Esta fachada comunica con la calle de forma similar a la noroeste, y al igual que esta presenta una hilera de árboles de hoja caduca a 4 metros de esta los cuales le aportan sombra durante los meses de verano. Es de especial importancia resaltar el hecho de que en esta fachada se va a llevar a cabo la instalación prevista del muro verde, más concretamente en el aula equivalente a la esquina superior derecha del edificio.

## 2.2. SOFTWARE

Para la realización del presente proyecto de Final de Máster ha sido necesario el uso de múltiples herramientas informáticas capaces de realizar tres funciones cruciales para el correcto desarrollo de las actuaciones recogidas en la presente memoria: la definición de la geometría del edificio, la introducción de las variables del inmueble que afectan al cálculo de cargas térmicas acompañadas de su simulación, y finalmente, la visualización de los parámetros relevantes arrojados fruto de la simulación térmica realizada para los periodos más representativos.

Centrándose en la primera tarea, la relativa a la definición de la geometría del edificio se van a emplear dos herramientas informáticas capaces de llevar a cabo estas actuaciones de forma sencilla. Por un lado, para poder transcribir los planos del edificio objeto a un formato digital se emplea un **software de dibujo asistido por computadora (CAD)**, en el caso que atañe este proyecto, se emplea el software libre NanoCAD 5.0. por su accesibilidad y facilidad de uso, aunque otros programas similares como AutoCad o SketchUp son perfectamente válidos para realizar esta tarea.



*Ilustración 11. Logo de NanoCAD 5.0. (NanoCAD, 2017)*

Gracias al uso de este programa, y llamando a las diferentes capas empleadas para su definición de formas concretas tal y como se verá en próximos apartados, se puede conseguir pasar de un plano bidimensional, a un modelo tridimensional exportable a EnergyPlus (el software de simulación energética empleado) gracias al empleo de un programa adicional llamado **Genera 3D** desarrollado por el Departamento de Termodinámica de la Universitat Politècnica de Valencia. Este programa parte de un fichero en formato .dxf por cada piso del edificio, mostrando la cota a la que se encuentra cada planta.



*Ilustración 12. Logo de Genera 3D (www.calculaconatecyr.com)*

Una vez definida la geometría del edificio entra en juego la herramienta de simulación energética de edificios **EnergyPlus**, un software de gran prestigio y ampliamente extendido para el modelado del consumo energético para calefacción, refrigeración, ventilación, iluminación y otras cargas enchufadas y de proceso. Originalmente centrado para su uso en edificios comerciales, EnergyPlus se ha expandido durante los últimos años con capacidades de modelado relevantes para la simulación de edificios residenciales y centros de datos.



*Ilustración 13. Logo de EnergyPlus (EnergyPlus, 2016)*

El software cuenta con una implementación de físicas del edificio para el aire, humedad y transmisión de calor; incluyendo el tratamiento de la transmisión de calor radiativa y convectiva de forma separada para apoyar el modelado de sistemas radiantes y el cálculo de las métricas de confort térmico. Adicionalmente, el programa es capaz de calcular la iluminación, sombreado, además de una larga lista de opciones. Este software incluye un gran set de componentes de planta y HVAC con una configuración flexible de estos a nivel de componente.

EnergyPlus, ha sido financiado por el Departamento de Energía de Estados Unidos y la “Building Technologies Office” y se verifica de acuerdo a la metodología “Standard 140” de la ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers) la cual se está expandiendo en la actualidad con datos medidos provenientes de instalaciones de pruebas altamente instrumentadas y bien caracterizadas. En los últimos años se ha visto el lanzamiento de múltiples herramientas e interfaces de usuario de terceros las cuales expanden el alcance del software a la par que ofrecen soluciones más visuales para introducir y visualizar los diferentes parámetros y resultados del edificio estudiado.

A continuación, se usa **xEsoView 0.3.2.**, el cual se trata de un visor de archivos “.eso” de EnergyPlus el cual da una rápida vista general de los resultados de simulación, facilitando ampliamente la tarea de recopilación de resultados favoreciendo un análisis más acertado y exhaustivo.



*Ilustración 14. Logo de xEsoView*

xEsoView muestra, por una parte, todos los nombres de las variables simuladas en una lista la cual cuenta con funcionalidades tales como ordenado o filtrado; mientras que por la otra parte se muestra una representación gráfica de la variable seleccionada. El eje temporal permite ser cambiado a una medida horaria, diaria, semanal, mensual o total, pudiéndose hacer zoom sobre el mismo para observar los resultados con un mayor nivel de detalle. Mediante un cajetín de selección se permite cambiar entre los diferentes entornos definidos tales como el día de diseño de verano o el periodo de ejecución. El propio programa permite copiar la información obtenida sobre una hoja de cálculo para ampliar el análisis o exportar los resultados a un archivo PDF.

Finalmente, como se expande en el apartado 2.3.4. referente a la simulación del muro verde, se ha empleado el software libre **Elements**, el cual permite modificar de una forma sencilla e intuitiva los archivos meteorológicos “.bin”, “.fmt” o “.epw” mediante el uso de tablas editables las cuales mantienen de forma automática las relaciones psicrométricas y solares entre variables.



*Ilustración 15. Logo de Elements (Elements, 2016)*

## 2.3. SIMULACIÓN ENERGÉTICA DEL EDIFICIO

### 2.3.1. Introducción de la geometría del edificio

De forma previa a la simulación del edificio se debe llevar cabo la **obtención de un archivo “.dxf” mediante el uso de una herramienta de dibujo CAD**, como NanoCAD 5.0. partiendo normalmente de los planos en ese mismo formato del edificio y simplificándolos para poder ser exportados al software Genera3D.

En el caso que atañe al presente proyecto no se tiene registro de ningún tipo de planos en formato digital sobre los que partir, por lo que es necesario transcribir los planos en formato físico mediante el uso de la escala para poder obtener un archivo en formato “.dxf” compatible con Genera3D. En estos planos indicados en las ilustraciones 16 y 17 se señala dentro del recuadro rojo el edificio de infantil simulado como objeto del presente proyecto, dentro de cada habitación se indica la función de la misma en el edificio, lo cual resulta de gran importancia para determinar de forma preliminar si estas van a tener requerimientos de climatización o no.

Para ello se han impreso los planos manteniendo la escala presente, y se ha obtenido de tal forma las dimensiones de cada una de las habitaciones que componen los planos del edificio. Es interesante resaltar para la tarea de obtener las dimensiones de los diferentes espacios del edificio el hecho de que este está construido de forma modular empleando unos muros exteriores prefabricados y ensamblados entre sí.

Estos bloques constructivos presentan dos tamaños diferentes ocupando los más grandes el espacio dedicado a cubrir los muros de los diferentes espacios habitables, mientras que los más pequeños se ocupan de forma generalizada a rodear el espacio existente entre ambas plantas.

- Bloques de grandes dimensiones: 1,5 metros de ancho por 0,5 metros de alto.
- Bloques de pequeñas dimensiones: 1,5 metros de ancho por 0,35 metros de alto.

Siendo el ancho de 1,5 metros común para los bloques de ambas dimensiones, y teniendo en cuenta que de forma generalizada las particiones interiores coinciden con el principio o final de alguno de estos bloques constructivos prefabricados, se puede deducir que tanto el ancho como el largo de cada una de las aulas se tratará de un múltiplo de 1,5; coincidiendo así con las dimensiones generales del edificio de 25,5 metros de ancho y 15 metros de largo, lo que equivale a 17 bloques de ancho y 10 de largo.

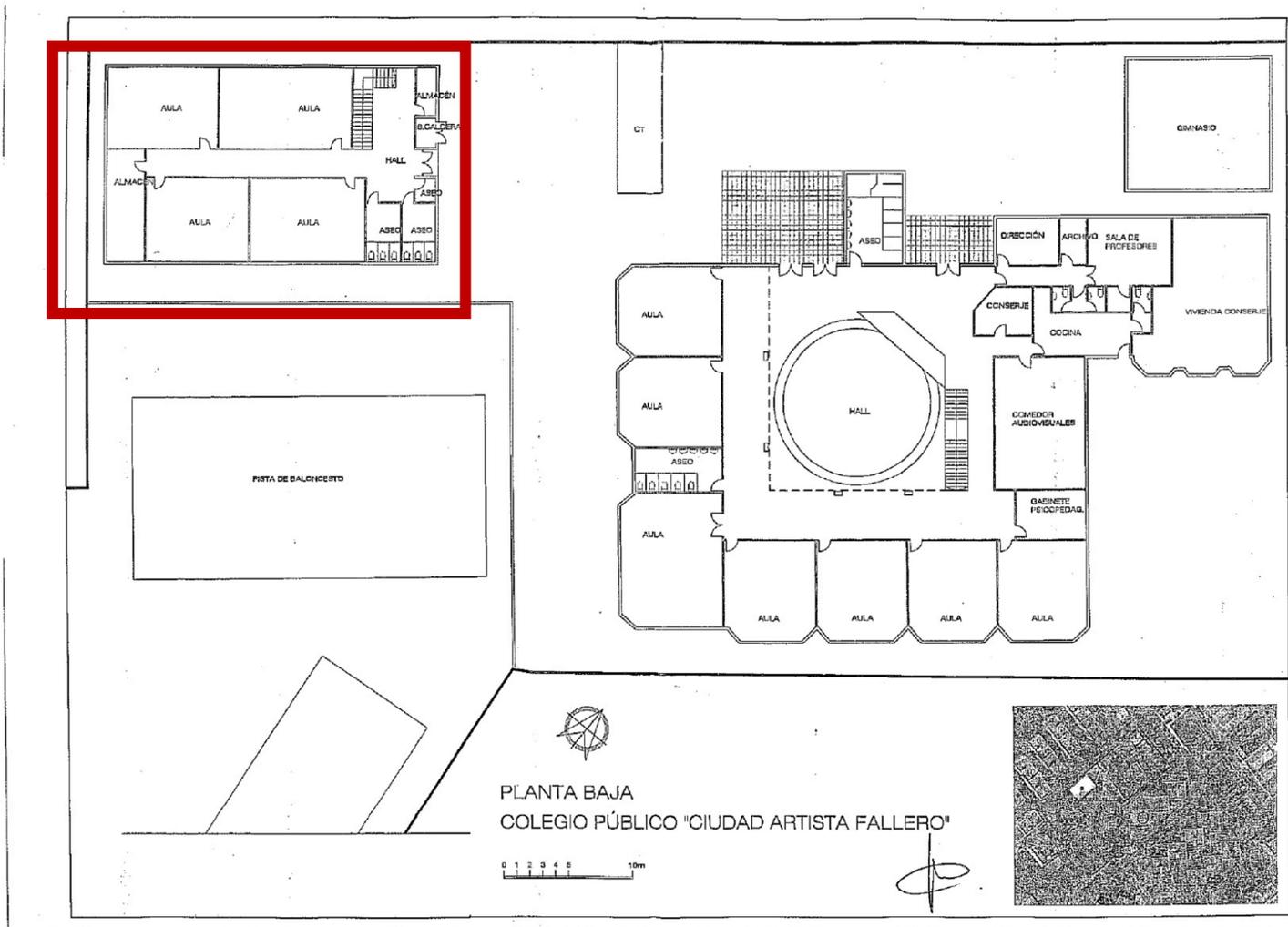


Ilustración 16. Plano de la planta baja del CEIP Ciudad Artista Fallero

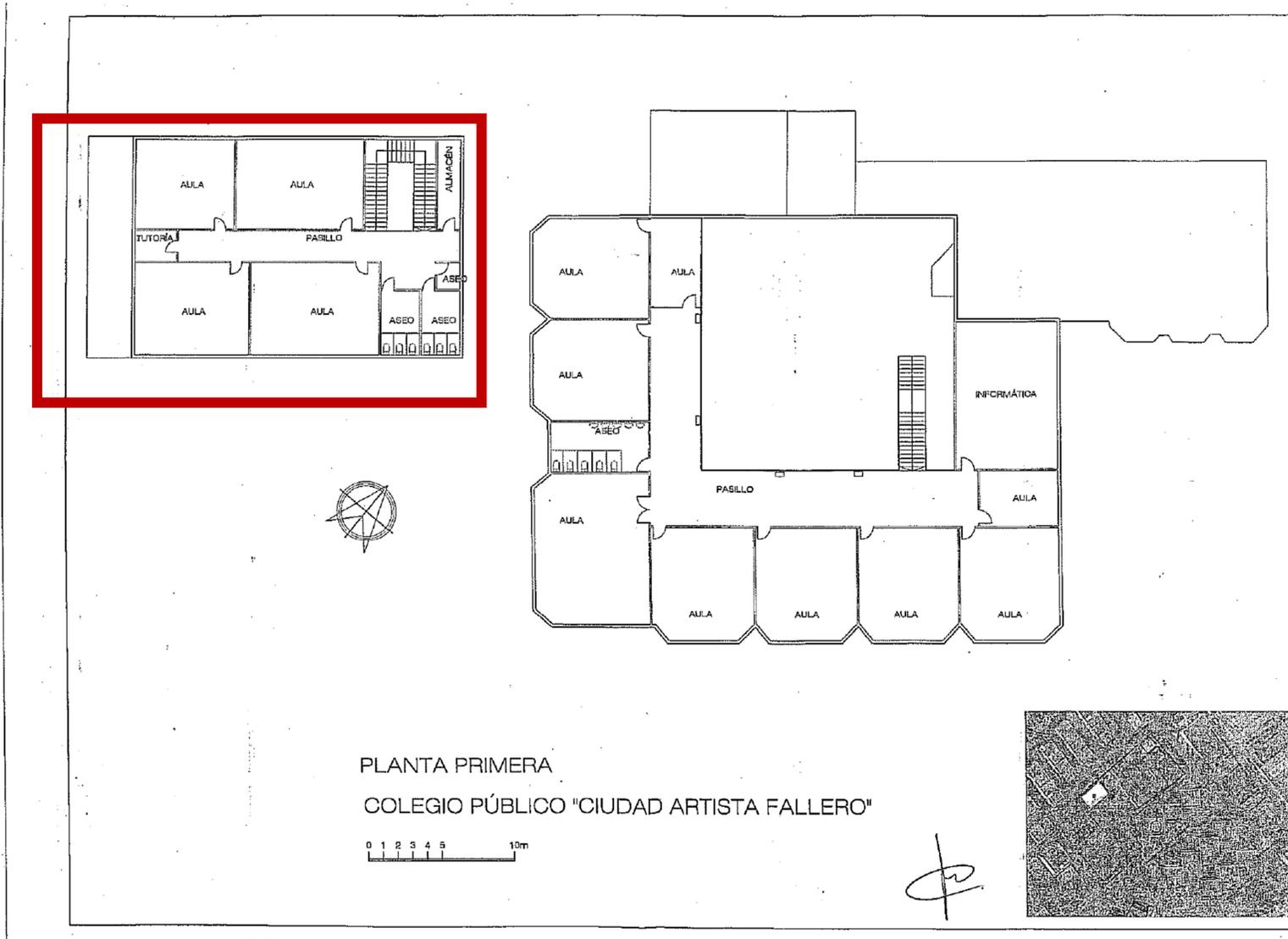
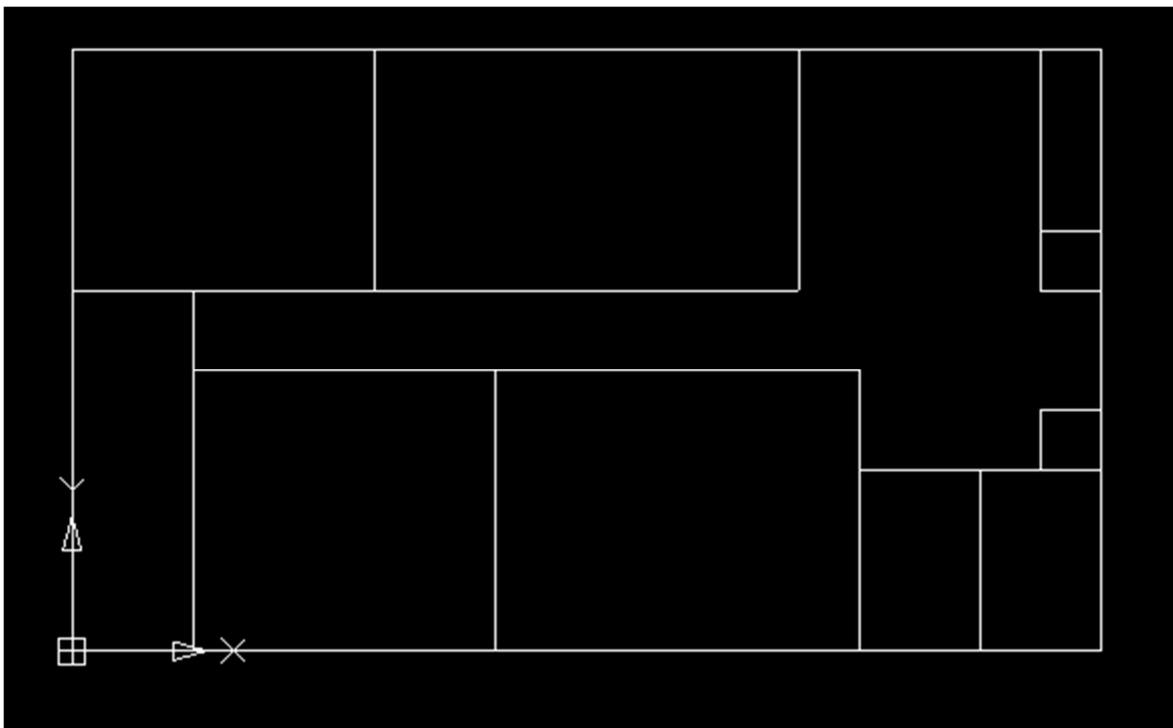


Ilustración 17. Plano de la primera planta del CEIP Ciudad Artista Fallero

Para demostrar la metodología de introducción se emplea como ejemplo el caso asociado a la planta baja. Para ello, en primer lugar, mediante el uso de la herramienta “línea por puntos”.

Teniendo en cuenta que se tienen dos plantas con unas dimensiones generales diferentes es de vital importancia definir un punto de inicio común, para ello se ha empleado como punto (0,0) la esquina inferior izquierda del edificio en el caso de la planta y se ha comenzado a dibujar su geometría desde ahí. Sin embargo, en la primera planta, al encontrarse esta desplazada el punto (0,0) no coincidirá con la esquina inferior izquierda de esta planta, sino que esta se encontrará desplazada 3 metros en el eje horizontal en sentido positivo con respecto al origen de coordenadas.

De tal forma, en primer lugar, se introduce con la capa por defecto la geometría general del edificio a modo de esquema sin seguir ningún orden o metodología concreta para representar de forma esquemática la planta a simular.



*Ilustración 18. Esquema base de la planta baja del edificio estudiado*

Una vez definido el boceto de la planta baja del edificio, se procede a crear la capa “LIDER”. El nombre de esta capa es de especial importancia pues el software Genera3D la detecta como parte de la envoltura del edificio, convirtiendo así cada una de las polilíneas del plano “.dxf” en cada uno de los espacios del edificio.

Empleando la capa “LIDER” recién creada, se utiliza la función “boundary” del software NANOCAD 5.0. para crear polilíneas cerradas a partir de cada uno de los espacios cerrados definidos por la capa por defecto empleada para dibujar el esqueleto del edificio.

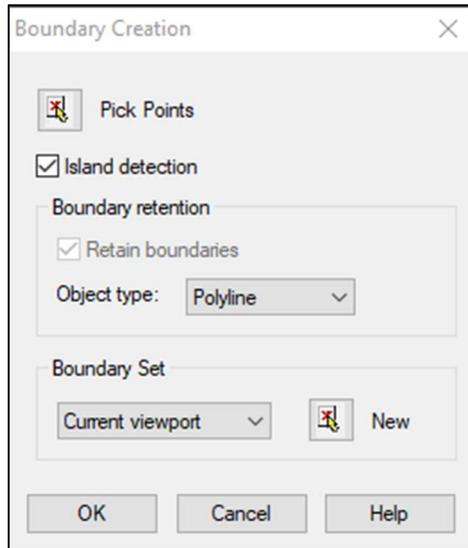


Ilustración 19. Herramienta "BOUNDARY"

Para ello, en el desplegable donde se indica el tipo de objeto se señala la opción polilínea y se hace clic sobre la opción "pick points". Acto seguido se clica con el botón izquierdo en el interior de cada uno de los espacios cerrados definidos por la capa predeterminada del programa procurando no seleccionar el mismo espacio más de una vez. Tras haber finalizado, se pulsa intro creándose de tal forma tantas polilíneas cerradas bajo la capa "LIDER" como espacios presenta la planta, once en el caso de la planta baja empleada como ejemplo.

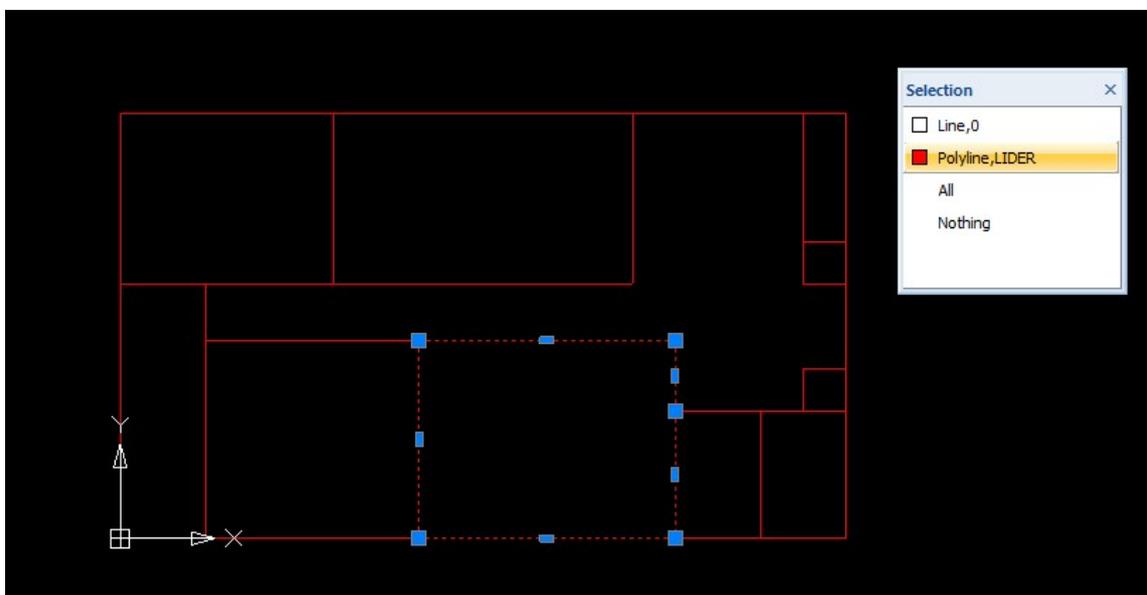
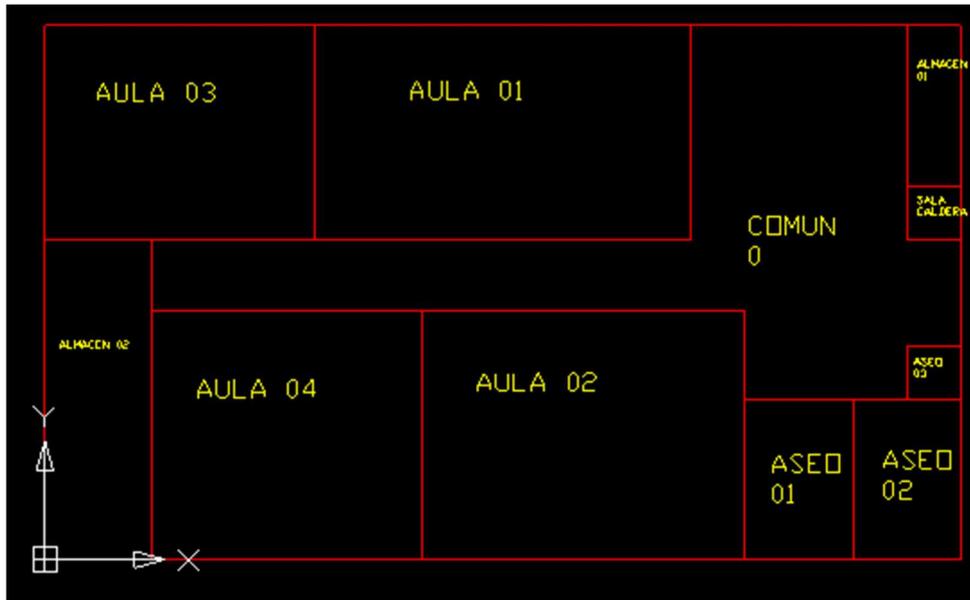


Ilustración 20. Espacios de la planta baja definidos mediante la capa "LIDER"

Como se observa en la ilustración superior, sobre la capa predeterminada se han creado los espacios bajo la capa "LIDER".

A continuación, a fin de añadir una nomenclatura unificada a las diferentes zonas del edificio para facilitar su identificación durante el análisis de la simulación energética, se crea la capa llamada "TEXTO\_LIDER". Gracias a la creación de esta capa, y mediante la herramienta de texto del software de dibujo CAD se introduce el nombre deseado para cada zona dentro de cada uno de los espacios definidos previamente por la polilíneas dibujadas en la capa "LIDER".



*Ilustración 21. Nombres de los espacios de la planta baja asignados bajo la capa "TEXTO\_LIDER"*

Finalmente, es necesario introducir las diferentes ventanas del edificio. Debido a que el único plano existente del edificio no muestra la ubicación de sus ventanas, hubiera sido necesario ubicarlas mediante una serie de mediciones llevadas a cabo en el edificio.

No obstante, debido a la naturaleza modular del edificio construido por paneles de hormigón prefabricados con un ancho fijo de 1,5 metros, se ha observado que las ventanas, de 1,4 metros de ancho independientemente de su tipología, se hayan centradas horizontalmente en los paneles en los cuales van incorporadas, facilitando la colocación de estas en el software CAD gracias a una rápida inspección visual del edificio.

Para poder introducir estas ventanas de forma que Genera3D sea capaz de identificarlas como tal, es necesaria la creación de la capa "V\_LIDER[X][Y]" siendo "X" la altura de la ventana e "Y" la distancia relativa existente desde la base inferior de la ventana hasta el suelo de la planta representada.

En el caso del edificio a simular, se dispone de dos tipologías de ventana diferenciadas. Por una parte, se tienen las ventanas cuadradas de mayor tamaño, dispuestas de forma general en las aulas, con la excepción de una de ellas en cada piso que comunica con la parte de la escalera de la zona común y la que comunica con la tutoría; que presentan una altura de 1,4 metros y una distancia relativa a la base de la planta de 1,25, siendo representadas de tal forma con la capa de nombre "V\_LIDER[1.4][1.25]".

Por otra parte, se tienen otra serie de ventanas rectangulares de menor tamaño ubicadas en los muros exteriores de los aseos, almacenes y zonas comunes; estas ventanas tienen una altura de 0,4 metros y una distancia relativa a la base de su planta de 2 metros, por lo que se han representado bajo la capa "V\_LIDER[0.4][2]".

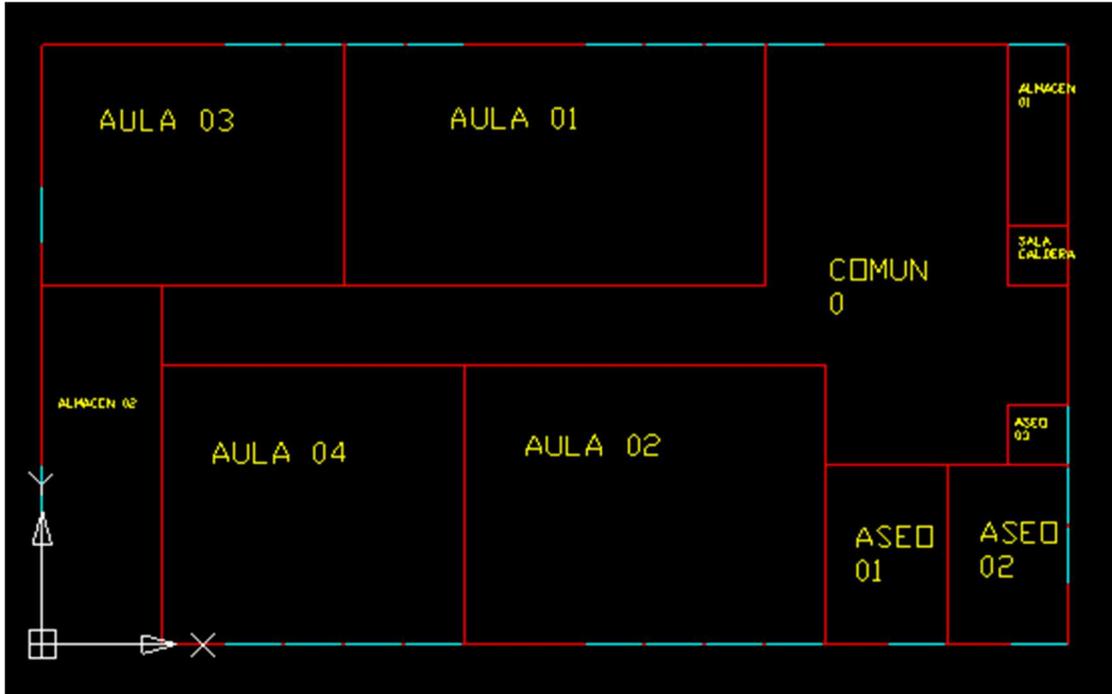


Ilustración 22. Archivo ".dxf" final de la planta baja

De forma equivalente, siguiendo una metodología análoga a la llevada a cabo para obtener el archivo ".dxf" simplificado y con la nomenclatura de capa adecuada para que Genera3D lo transforme en un modelo tridimensional del edificio, se repiten los pasos seguidos empleados para la definición de la planta baja extrapolándolos a la primera planta.

Acto seguido, se muestra una captura de pantalla de archivo ".dxf" empleado para la primera planta del edificio.

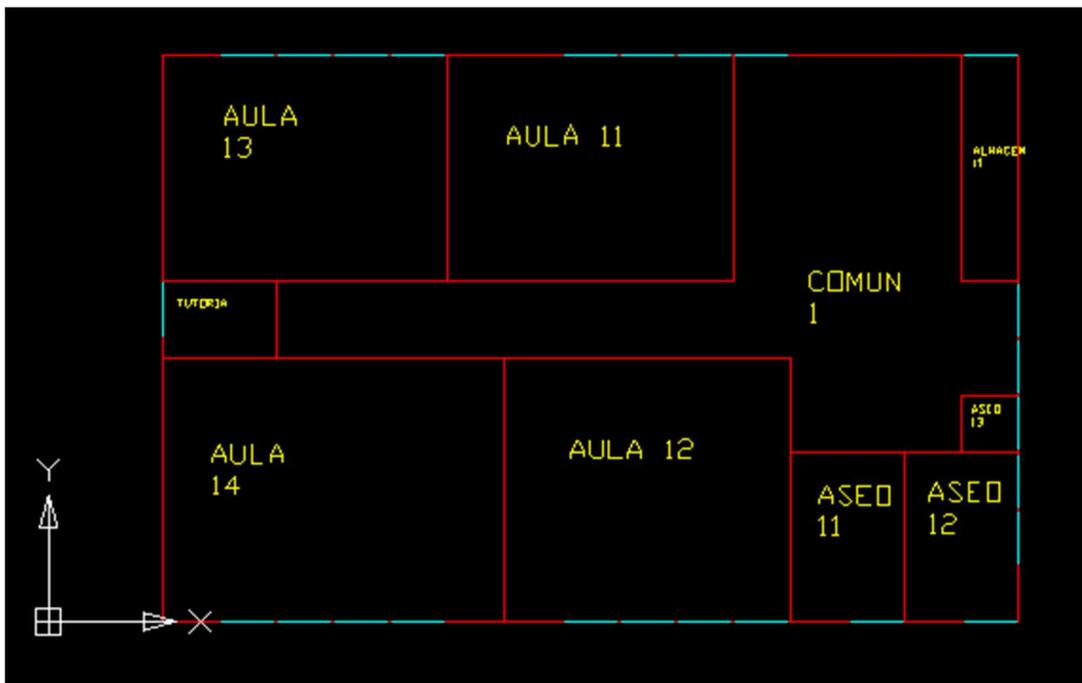


Ilustración 23. archivo ".dxf" final de la primera planta

Hágase notar como se ha desplazado tres metros la esquina inferior izquierda con respecto al origen de coordenadas para asegurar que se comparte el mismo punto de referencia con respecto a la planta baja.

Una vez obtenidos ambos archivos “.dxf” para las dos plantas a partir de NanoCAD 5.0. es necesario pasar de un modelo en dos dimensiones a uno tridimensional que además sea capaz de poder ser exportado al software de simulación energética “EnergyPlus”. **Para obtener un modelo capaz de ser introducido en “EnergyPlus” se hará uso del software Genera3D.**

En este programa, se cargan en primer lugar los archivos “.dxf” de las diferentes plantas del edificio en orden ascendente, al lado de cada una de las plantas se indica la altura absoluta de cada una de las bases de las plantas que conforman la estructura simulada. En el caso que recoge este proyecto la planta baja se haya a nivel del suelo y la primera planta se erige a 3 metros sobre esta.

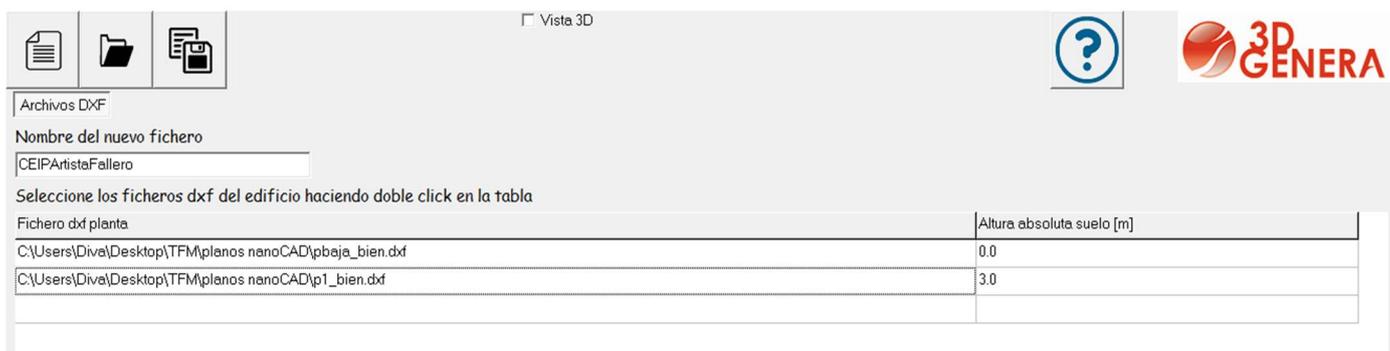


Ilustración 24. Introducción de plantas y alturas en Genera3D

En la misma ventana, se pueden añadir los datos adicionales presentados en la siguiente ilustración. La altura relativa de la última planta debe añadirse de forma obligatoria ya que en la tabla anterior solo se define por completo la planta baja, y las intermedias en el caso de que las hubiera. Por otro lado, los parámetros de altura de ventanas y altura del alfeizar solo se tienen en cuenta si en la capa del software CAD que las define, “V\_LIDER” no se indican estos valores entre los corchetes; en el caso que respecta al presente proyecto, al no tener un tamaño de ventana unificado en el edificio se ha optado por dejar claro las dimensiones de cada ventana mediante su capa “V\_LIDER” correspondiente.

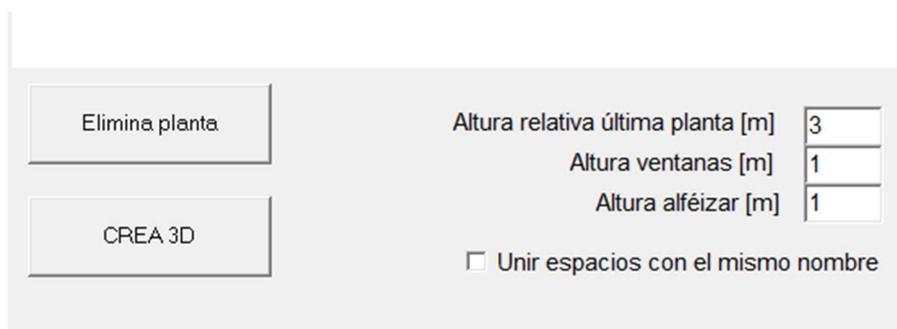


Ilustración 25. Más opciones de Genera3D

Una vez terminado, se hace clic en el botón “CREA 3D” para obtener una representación tridimensional del edificio objeto de análisis.

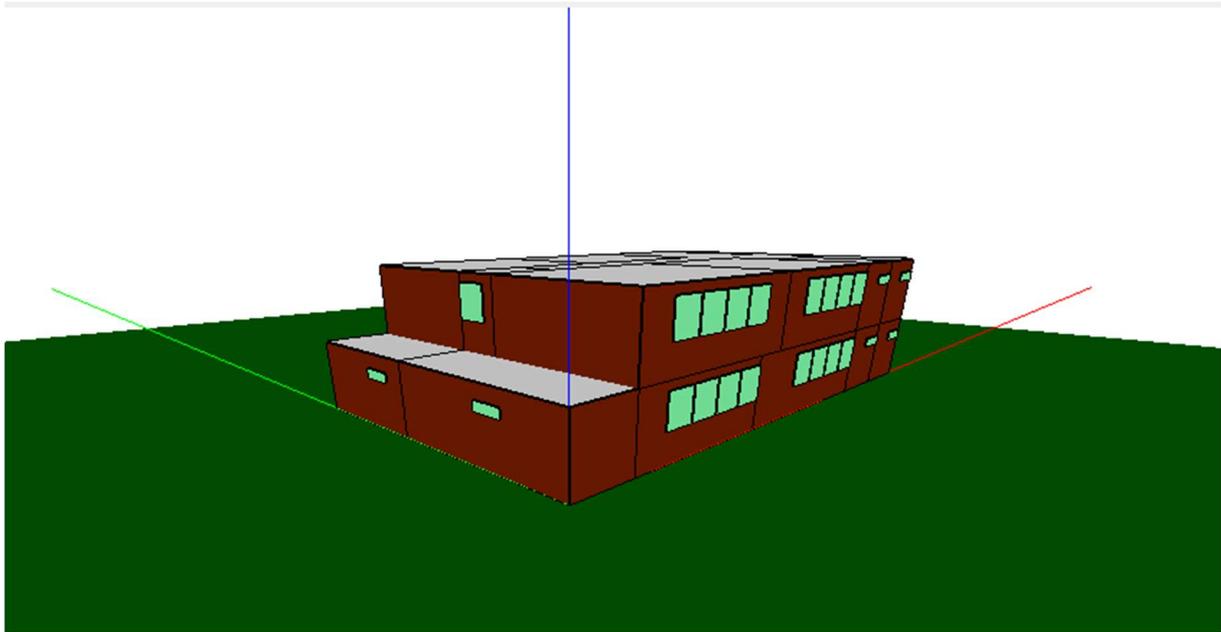


Ilustración 26. Modelo 3D del edificio a simular

Con estos pasos ya realizados, se podría proceder a la exportación del modelo tridimensional producido por Genera3D al software de simulación energética EnergyPlus, no obstante, es importante revisar cada uno de los espacios y sus cerramientos para asegurar que no se ha duplicado ninguna zona o se presenta alguna anomalía en la arquitectura del edificio simulado.

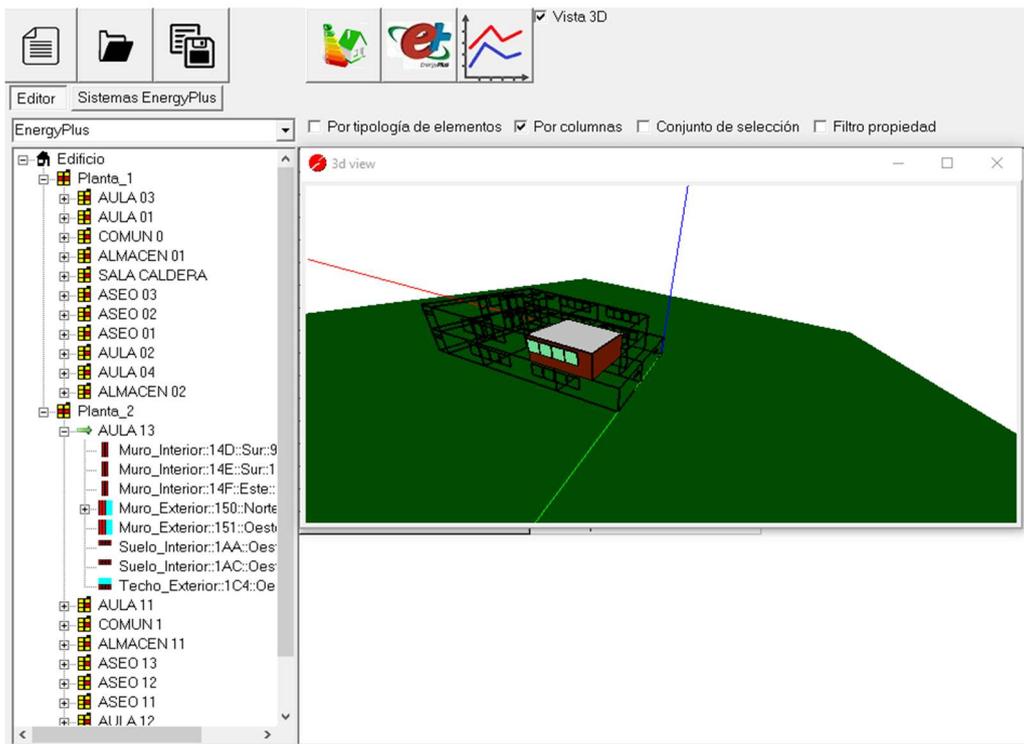


Ilustración 27. Detalle del aula donde se va a implementar el muro verde

Antes de proceder a la simulación, se debe además de asegurarse que la versión de EnergyPlus a la cual vamos a exportar coincide con el tipo de archivo que Genera3D va a crear. Para ello se hace clic en la pestaña “Sistemas EnergyPlus” justo encima del árbol de zonas del edificio y se hace seguro de que en el desplegable donde pone “Versión EnergyPlus” se ha seleccionado la versión 8.6. En esta misma ventana se pueden seleccionar las variables de salida en caso de querer obtener resultados rápidos del edificio con los parámetros predeterminados por EnergyPlus, sin embargo, no resulta relevante ya que se pueden modificar en el propio software de simulación energética.

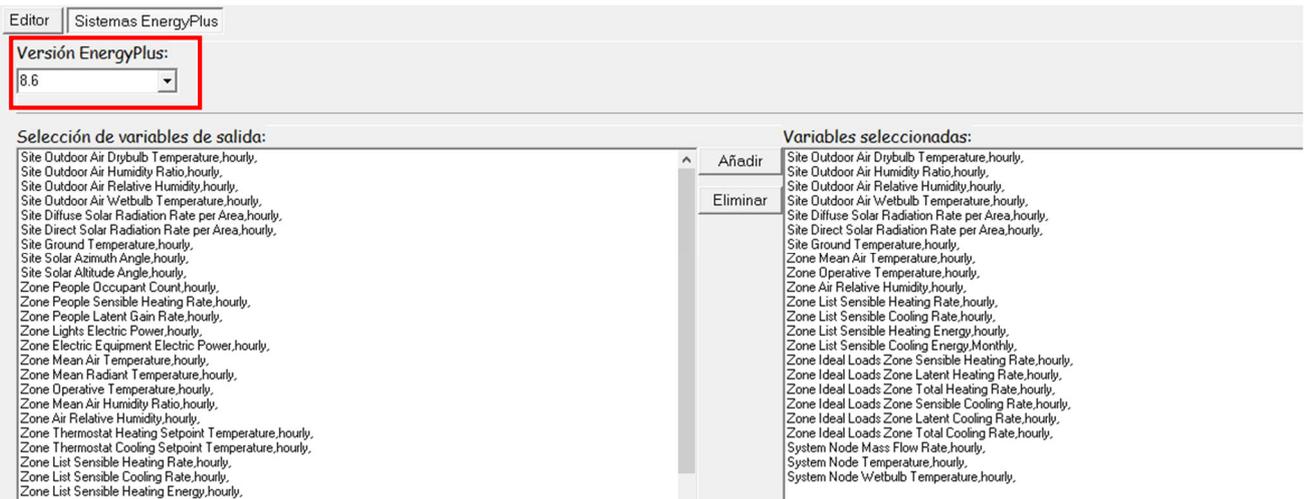


Ilustración 28. Selección de la versión de EnergyPlus

Finalmente, se presiona el botón situado en la parte superior de la interfaz que muestra el icono de EnergyPlus obteniendo finalmente el archivo “.idf” con los valores predeterminados por EnergyPlus pero la geometría y zonificación definida a lo largo todos los pasos que han precedido este punto del desarrollo del proyecto.



Ilustración 29. Selección de la opción para exportar a EnergyPlus

### 2.3.2. Simulación energética del caso base

A lo largo de este apartado se parte del archivo “.idf” producido por Genera3D, a raíz del mismo se modificarán todos los parámetros relevantes para el cálculo de las cargas térmicas del edificio, desde la composición de cerramientos y huecos hasta las cargas derivadas de la ocupación y la aparatación eléctrica instalada en los espacios. Adicionalmente, se introducirá el sistema de climatización empleado en el edificio con unas características lo más próximas al sistema real posible.

En primer lugar, se procede a la simulación de un caso base el cual no se vea afectado por ningún tipo de Solución Basada en la Naturaleza, es decir, sin contabilizar el efecto del sombreado vegetal ni del futuro muro verde a instalar en la fachada Suroeste.

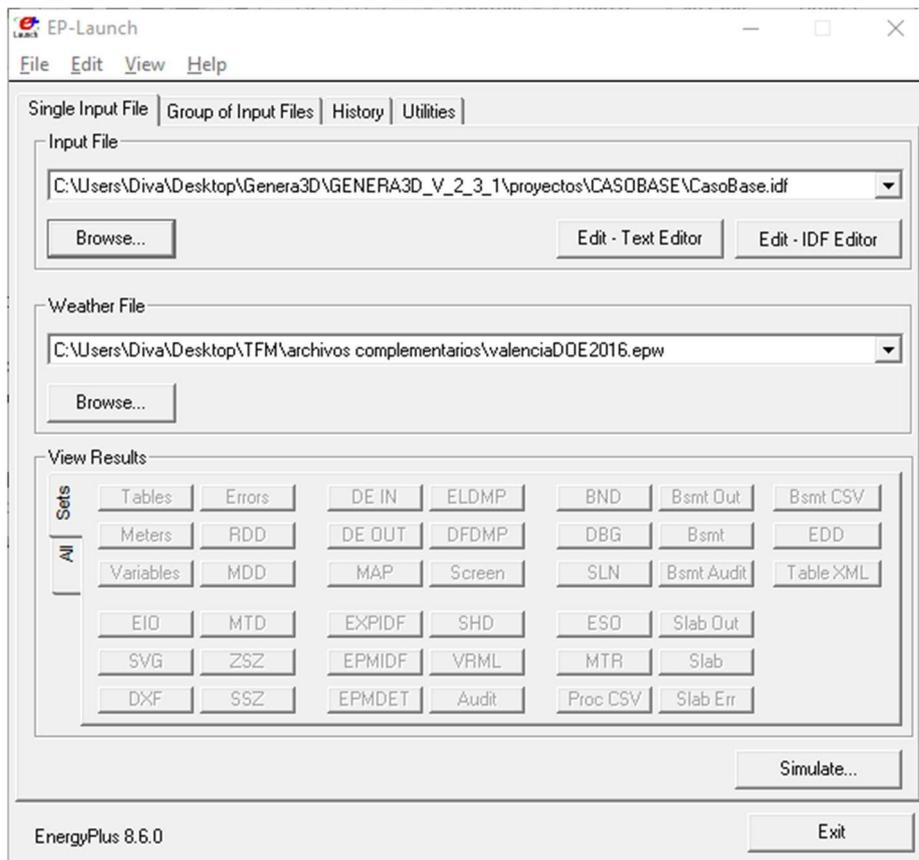


Ilustración 30. Launcher de EnergyPlus 8.6.0.

Para ello es necesario descargar un **archivo meteorológico en formato “.epw”** el cual contenga los datos de las variables meteorológicas más relevantes para la ciudad de Valencia a lo largo de un año. Entre estas variables son de especial importancia las relacionadas con la temperatura y humedad exterior, radiación solar y velocidad del viento entre otras. En este caso se ha empleado archivo meteorológico emitido por el DOE (Department of Energy) para el año 2016.

Acto seguido, se procede a la modificación del archivo “.idf” cambiando los datos predeterminados por los específicos del edificio.

En primer lugar, la primera pestaña relevante sobre la que se debe modificar información se trata de la presentada bajo el nombre “**Building**”

Field	Units	Obj1
Name		PROYECTO
North Axis	deg	-37
Terrain		City
Loads Convergence Tolerance Value		0,5
Temperature Convergence Tolerance Value	deltaC	0,5
Solar Distribution		FullInteriorAndExteri
Maximum Number of Warmup Days		25
Minimum Number of Warmup Days		

Ilustración 31. Apartado "Building"

Además de introducir el nombre del proyecto, en este apartado se presenta información altamente relevante para la simulación. En primer lugar, se ha de indicar el ángulo que presenta el norte del edificio simulado según la orientación de su plano “.dxp” con respecto al norte auténtico, teniendo un valor positivo si este sigue un sentido horario. En el caso del proyecto analizado, como se observa en la imagen el ángulo es de -37º



Ilustración 32. Orientación del edificio para EnergyPlus

Otro parámetro relevante es el de “Solar Distribution”, en el cual si se quiere determinar de forma efectiva el impacto del sombreado y del jardín vertical se debe marcar la opción “FullInteriorAndExterior”.

A continuación, se debe modificar la **composición de los diferentes cerramientos** del edificio introduciendo los materiales desde la capa más exterior del cerramiento a la más interior, los cuales se agrupan en función de su tipo, teniendo que definir los materiales y espesores de la cubierta, forjado al terreno, muros exteriores, medianeras, techo interior y suelo interior. El programa, de forma predefinida asigna un tipo de construcción uniforme para todos los cerramientos dentro de una misma categoría, por lo que en el caso de este proyecto, al no tenerse ningún tipo de cerramiento singular, simplemente con modificar los materiales de estas construcciones predeterminadas se actualizarán las composiciones de forma automática sin necesidad de crear nuevos objetos dentro del apartado.

Field	Units	Obj1	Obj2	Obj3	Obj4	Obj5	Obj6
Name		Cubierta	Forjado_terreno	Muro_exterior	Medianera	Techo_interior	Suelo_interior
Outside Layer		Fibrocemento_cubie	Tierra_vegetal	Mortero_cemento_e	Enlucido_1	Plaqueta o baldosa	Placa de yeso tech
Layer 2		FU entrevigado cer:	Hormigon forjado_te	Hormigon muro_ext	Placa de yeso part	FU entrevigado cer:	F05 Ceiling air spac
Layer 3		F05 Ceiling air spac	Plaqueta o baldosa	Enlucido de yeso m	Enlucido_1	F05 Ceiling air spac	FU entrevigado cer:
Layer 4		Placa de yeso tech				Placa de yeso tech	Plaqueta o baldosa
Layer 5							

Ilustración 33. Apartado "Construction"

Para obtener las composiciones y dimensiones de cada uno de los tipos de cerramiento del edificio ha sido necesaria la realización de una serie de identificaciones y medidas in situ al no tenerse ningún tipo de información registrada con respecto a la composición del mismo.

A continuación, se presentan en mayor detalle los materiales que componen cada uno de los elementos constructivos del edificio.

### Muro exterior

Los muros exteriores están conformados por bloques prefabricados de hormigón con un enlucido de yeso en su cara interior y mortero de cemento en la parte externa del mismo. Es importante destacar la falta de cualquier tipo de material aislante es el muro.

Para ello se han empleado una serie de materiales lo más similares posible a los que se emplean en la construcción del edificio obtenidos a partir de bibliotecas de materiales y copiados directamente de estas al apartado "Materials" del software, manteniendo sus valores de conductividad, densidad y calor específico, y modificando el espesor de los mismos en función de las medidas en las visitas al edificio.

Tabla 1. Composición del muro exterior

Capas (de más externa a más interna)	Material	Espesor (metros)
Capa 1	Mortero de cemento	0,01
Capa 2	Hormigón	0,10
Capa 3	Enlucido de yeso	0,01

### Forjado con el terreno

El forjado con el terreno representa el suelo de la planta baja que está en contacto directo con la base de la parcela. En el caso que recoge este proyecto, este está conformado por tierra en la parte más baja, seguida de un recubrimiento de cemento para solidificar la base de la estructura y coronado con una serie de baldosas de gres en la parte interior del edificio.

Partiendo de materiales similares de las diferentes bibliotecas de datos del programa se obtiene la siguiente composición.

*Tabla 2. Composición del forjado con el terreno*

Capas (de más externa a más interna)	Material	Espesor (metros)
Capa 1	Tierra vegetal	0,35
Capa 2	Hormigón	0,23
Capa 3	Baldosa de gres	0,02

El espesor del hormigón se ha podido medir gracias que desde el exterior se puede apreciar la diferencia de altura entre el suelo de la parcela y el del edificio.



*Ilustración 34. Detalle del desnivel donde de medida de espesor del forjado con el terreno*

## Medianeras

Estos componentes de la envolvente realizan la separación entre los espacios interiores del edificio, suelen tener bajo espesor y malas características aislantes debido a que no se ven expuestos a las condiciones exteriores de forma directa, sin embargo, tienen un ligero impacto en el caso de zonas climatizadas que comunican con otras que no lo están.

En este caso, las medianeras están compuestas por una sencilla placa de yeso con un enlucido en ambas caras para mejorar la estética de las mismas.

Tabla 3. Composición de las medianeras

Capas (de más externa a más interna)	Material	Espesor (metros)
Capa 1	Enlucido	0,01
Capa 2	Placa de yeso	0,08
Capa 3	Enlucido	0,01

## Techo interior y suelo interior

Estos elementos, a pesar de que aparecen separados como categorías diferentes ambos representan la misma componente de la envolvente, en este caso, tanto los techos interiores de la planta baja como los suelos de la primera planta. Sin embargo, es necesario representar ambos elementos duplicados con el orden de las capas invertido; esto se debe a que en EnergyPlus cada superficie pertenece a una zona, por lo que las superficies compartidas entre dos o más zonas deben estar duplicadas. Aunque esto sucede también con las medianeras, con los techos interiores es aún más relevante ya que si no estuviera duplicado el espacio de la planta de arriba no tendría suelo para su simulación.

El techo interior, y de forma inversa el suelo interior, parte de una placa de yeso situada a la vista la cual da un espacio de aire interior a modo de falso techo. En la separación ya hacia la siguiente planta se tiene un entrevigado cerámico sobre el que se apoyan baldosas de gres idénticas a las del suelo de la planta baja.

Tabla 4. Composición del techo interior y el suelo interior

Capas (de más externa a más interna)	Material	Espesor (metros)
Capa 1	Baldosa de Gres	0,02
Capa 2	Entrevigado cerámico	0,20
Capa 3	Cámara de aire	0,50
Capa 4	Placa de yeso	0,012

## Cubierta

El último elemento a representar del edificio, se trata de la cubierta del mismo, la composición de la misma es muy similar a la de los techos interiores excepto por los materiales en contacto con el exterior. Presenta una placa de yeso que comunica con una cámara de aire y un entrevigado cerámico como los techos interiores, y que culmina en una lámina de fibrocemento que protege el edificio de las inclemencias climáticas. Para el espesor del fibrocemento, al no poder medirse de forma directa se ha tomado un espesor comercial típico para aplicaciones similares.

*Tabla 5. Composición de la cubierta*

Capas (de más externa a más interna)	Material	Espesor (metros)
Capa 1	Baldosa de Gres	0,068
Capa 2	Entrevigado cerámico	0,20
Capa 3	Cámara de aire	0,50
Capa 4	Placa de yeso	0,012

Una vez concluida la modificación de la composición de los cerramientos, se deben cambiar las características de los huecos del edificio, siendo de mayor relevancia tanto las ventanas como las puertas al exterior.

## Ventanas

En la propia categoría de “Construction”, donde se estaban introduciendo las características de los diferentes cerramientos del edificio, se modifica el material del objeto “Ventana” de forma que la composición de esta sea lo más parecido posible al vidrio presente en los ventanales del edificio.

En el caso que atañe el presente proyecto, a pesar de tener ventanas de diferentes dimensiones, la composición de ambas es la misma, pudiendo ser representadas las dos con un mismo objeto de EnergyPlus.

En primer lugar, se busca en las bibliotecas de materiales un vidrio con unas características similares a los del edificio y se copian en el apartado “WindowMaterial: Glazing”. En este caso, se tiene un cristal simple de 3 milímetros de grosor y ningún tipo de tratamiento para reducir o reflejar los efectos de la radiación incidente. Como se observa, el vidrio instalado se trata de un material muy poco eficiente desde el punto de vista energético, especialmente en un clima como el valenciano donde los meses cálidos suponen de forma general un consumo energético más marcado, por lo que se detecta un importante punto de mejora en el caso que se dé su sustitución.

Field	Units	Obj1
Name		CLEAR 3MM
Optical Data Type		SpectralAverage
Window Glass Spectral Data Set Name		
Thickness	m	0,003
Solar Transmittance at Normal Incidence		0,837
Front Side Solar Reflectance at Normal Incidence		0,075
Back Side Solar Reflectance at Normal Incidence		0,075
Visible Transmittance at Normal Incidence		0,898
Front Side Visible Reflectance at Normal Incidence		0,081
Back Side Visible Reflectance at Normal Incidence		0,081
Infrared Transmittance at Normal Incidence		0
Front Side Infrared Hemispherical Emissivity		0,84
Back Side Infrared Hemispherical Emissivity		0,84
Conductivity	W/m-K	0,9
Dirt Correction Factor for Solar and Visible Transmittance		
Solar Diffusing		
Young's modulus	Pa	
Poisson's ratio		

Ilustración 35. Apartado "WindowMaterial: Glazing"

La construcción "Ventana" debería estar indicada por defecto en el apartado "FenestrationSurface: Detailed", en el cual se han ubicado de forma automática las coordenadas de cada una de las ventanas gracias a los desarrollos previos llevados a cabo con Genera3D. Desde este apartado, se pueden definir otras características relevantes al edificio como puede ser la incorporación de dispositivos de sombreado para las ventanas o la composición y características de los marcos de las mismas.

Field	Units	Obj1	Obj2	Obj3	Obj4	Obj5	Obj6	Obj7	Obj8	Obj9	Obj10
Name		FE	FF	100	105	106	107	108	109	11A	11F
Surface Type		Window	Window	Window	Window	Window	Window	Window	Window	Window	Window
Construction Name		Ventana	Ventana	Ventana	Ventana	Ventana	Ventana	Ventana	Ventana	Ventana	Ventana
Building Surface Name		FC	FC	FD	103	103	103	103	103	118	11D
Outside Boundary Condition Object											
View Factor to Ground											
Shading Control Name		cortinas	cortinas		cortinas	cortinas	cortinas	cortinas	cortinas	cortinas	
Frame and Divider Name		marco_FE	marco_FF	marco_100	marco_105	marco_106	marco_107	marco_108	marco_109	marco_11A	marco_11F
Multiplier											
Number of Vertices		4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
Vertex 1 X-coordinate	m	5,949	7,449	0	9	10,5	14,949	16,45	17,95	19,45	25,45
Vertex 1 Y-coordinate	m	15	15	11,449	15	15	15	15	15	15	15
Vertex 1 Z-coordinate	m	1,25	1,25	2	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25	2
Vertex 2 X-coordinate	m	4,55	6,05	0	7,599	9,1	13,55	15,05	16,549	18,049	24,049
Vertex 2 Y-coordinate	m	15	15	10,05	15	15	15	15	15	15	15
Vertex 2 Z-coordinate	m	1,25	1,25	2	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25	2
Vertex 3 X-coordinate	m	4,55	6,05	0	7,599	9,1	13,55	15,05	16,549	18,049	24,049
Vertex 3 Y-coordinate	m	15	15	10,05	15	15	15	15	15	15	15
Vertex 3 Z-coordinate	m	2,65	2,65	2,4	2,65	2,65	2,65	2,65	2,65	2,65	2,4

Ilustración 36. Apartado "FenestrationSurface: Detailed"

Para la modificación de la composición de los marcos de las ventanas, se accede al elemento de la lista "WindowProperty: FrameAndDivider", el cual asigna un objeto en esta categoría por cada uno de los objetos del apartado "FenestrationSurface: Detailed". Al ser los marcos iguales en todas las ventanas, se han modificado las características térmicas más relevantes de los mismos por los valores típicos de

otros marcos de ventana de hierro sin rotura del puente térmico; así como la introducción de su espesor.

Field	Units	Obj5	Obj6	Obj7	Obj8	Obj9
Name		marco_106	marco_107	marco_108	marco_109	marco_11A
Frame Width	m	0,035	0,035	0,035	0,035	0,035
Frame Outside Projection	m					
Frame Inside Projection	m					
Frame Conductance	W/m2-K	5,7	5,7	5,7	5,7	5,7
Ratio of Frame-Edge Glass Conductance to Center-Of-Glass		1	1	1	1	1
Frame Solar Absorptance		0,7	0,7	0,7	0,7	0,7
Frame Visible Absorptance		0,7	0,7	0,7	0,7	0,7
Frame Thermal Hemispherical Emissivity		0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
Divider Type		DividedLite	DividedLite	DividedLite	DividedLite	DividedLite

Ilustración 37. Apartado "WindowProperty: FrameAndDivider"

Finalmente, se introducen los elementos de sombra de las ventanas, los cuales se tratan de cortinas interiores de color claro los cuales se ubican únicamente en los ventanales de mayor tamaño. Para ello se crea un objeto dentro del apartado "WindowProperty: ShadingControl".

Field	Units	Obj1
Name		cortinas
Shading Type		InteriorShade
Construction with Shading Name		
Shading Control Type		AlwaysOn
Schedule Name		
Setpoint	W/m2, W or deg	
Shading Control Is Scheduled		No
Glare Control Is Active		No
Shading Device Material Name		HIGH REFLECT - L
Type of Slat Angle Control for Blinds		FixedSlatAngle
Slat Angle Schedule Name		
Setpoint 2	W/m2 or deg C	

Ilustración 38. Apartado "WindowProperty: ShadingControl"

Para ello se debe definir el tipo de elemento de sombra, cortina interior, el tipo de control definido, predeterminado para estar siempre corridas y el material de la cortina, obtenido de una biblioteca de materiales empleando un meter con alta reflectancia y copiándolo sobre la categoría "WindowMaterial: Shade".

Una vez creado el elemento de sombra se modifica el campo "Shading Control Name" de la categoría "FenestrationSurface: Detailed" por el del objeto creado en el apartado de elementos de sombra mencionado con anterioridad para las ventanas en los que estos se encuentran instalados.

## Puerta al exterior

La puerta al exterior se trata de una construcción recogida en la categoría “Glazed Door”, la cual ha sido necesaria de introducir mediante sus coordenadas debido a que no se ha añadido de forma previa mediante la combinación de los softwares NanoCAD y Genera3D.

Field	Units	Obj1
Name		Puerta_ppal
Construction Name		Ventana
Building Surface Name		114
Shading Control Name		
Frame and Divider Name		marco_FE
Multiplier		1
Starting X Coordinate	m	0,5
Starting Z Coordinate	m	0
Length	m	2
Height	m	2

*Ilustración 39. Apartado "Glazed Door"*

Para ello se selecciona el tipo de construcción, la cual presenta un vidrio idéntico al de las ventanas, la superficie sobre la cual se ubica y el tipo de marco que tiene, el cual es un marco de hierro de características similares al de las ventanas e introducido de forma análoga en la categoría “WindowProperty: FrameAndDivider”.

Con todos los huecos y cerramientos del edificio completamente definido, es necesario llevar a cabo la modificación de los diferentes parámetros relevantes para el cálculo de las ganancias internas de calor debidas a la ocupación, ventilación, iluminación y uso de aparamenta eléctrica.

## Ocupación

En primer lugar, y teniendo en cuenta que probablemente sea la fuente de ganancias térmicas más grande en un edificio de estas características, se modifica el apartado “People” de EnergyPlus, el cual tiene en cuenta los parámetros más relevantes para calcular el efecto sobre el consumo energético que tiene la ocupación del edificio.

Field	Units	Obj1	Obj2	Obj3	Obj4	Obj5	Obj6	Obj7
Name		Ocupantes_AULA C	Ocupantes_AULA C	Ocupantes_COMUN	Ocupantes_ALMAC	Ocupantes_SALA C	Ocupantes_ASEO C	Ocupantes_ASEO C
Zone or ZoneList Name		AULA 03	AULA 01	COMUN 0	ALMACEN 01	SALA CALDERA	ASEO 03	ASEO 02
Number of People Schedule Name		OCUP_AULAS	OCUP_AULAS	OCUP_COMUN	OCUP_OTROS	OCUP_OTROS	OCUP_OTROS	OCUP_OTROS
Number of People Calculation Method		Area/Person	Area/Person	Area/Person	Area/Person	Area/Person	Area/Person	Area/Person
Number of People								
People per Zone Floor Area	person/m2							
Zone Floor Area per Person	m2/person	3	3,15	1,56	6,75	2,25	0,56	3,37
Fraction Radiant		0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
Sensible Heat Fraction		autocalculate	autocalculate	autocalculate	autocalculate	autocalculate	autocalculate	autocalculate
Activity Level Schedule Name		Activity_AULA 03	Activity_AULA 01	Activity_COMUN 0	Activity_ALMACEN	Activity_SALA CALD	Activity_ASEO 03	Activity_ASEO 02
Carbon Dioxide Generation Rate	m3/s-w	0,000000029	0,000000029	0,000000029	0,000000382	0,000000382	0,000000382	0,000000029
Enable ASHRAE 55 Comfort Warnings		No	No	No	No	No	No	No
Mean Radiant Temperature Calculation Type		ZoneAveraged	ZoneAveraged	ZoneAveraged	ZoneAveraged	ZoneAveraged	ZoneAveraged	ZoneAveraged

Ilustración 40. Apartado “People”

En este apartado se tiene un objeto para cada uno de los espacios definidos para el edificio, de los que hay que definir una serie de parámetros mínimos para poder contabilizar el efecto que la ocupación tiene sobre la demanda energética del edificio.

En primer lugar, es necesario definir la densidad de ocupación de alguna forma, el método empleado, al conocer el aforo de las aulas y del edificio en general, así como la superficie de cada uno de sus espacios se ha empleado el método de área por persona, el cual define los metros cuadrados de media que cada ocupante tendría de espacio en esa zona si este estuviera repartido de forma equitativa entre todos los individuos que lo ocupan. Se ha de tener en cuenta, que para tener un cálculo lo más fiel posible se asume que el número de ocupantes en cada espacio es el máximo posible dado en condiciones de funcionamiento normales del edificio.

### Planta baja

Tabla 6. Densidad de ocupación de la planta baja

Zona	Área (m2)	Ocupantes	m2/ocupante
AULA 01	63	20	3,15
AULA 02	63	20	3,15
AULA 03	45	15	3,00
AULA 04	52	15	3,47
COMUN 0	93,75	60	1,56
ASEO 01	13,5	4	3,38
ASEO 02	13,5	4	3,38
ASEO 03	2,25	4	0,56
ALMACEN 01	6,75	1	6,75
ALMACEN 02	27	2	13,50
SALA CALDERA	2,25	1	2,25

## Primera planta

Tabla 7. Densidad de ocupación de la primera planta

Zona	Area (m2)	Ocupantes	m2/ocupante
AULA 11	45	15	3,00
AULA 12	52,5	15	3,50
AULA 13	45	15	3,00
AULA 14	63	20	3,15
COMUN 1	87,75	60	1,46
ASEO 11	13,5	4	3,38
ASEO 12	13,5	4	3,38
ASEO 13	2,25	4	0,56
ALMACEN 11	9	2	4,50
TUTORIA	6	1	6,00

Además, ha sido necesario introducir los ratios de generación de dióxido de carbono, los cuales están predefinidos en  $3,8E-08 \text{ m}^3/\text{s}*\text{W}$  para un ser humano adulto, estos valores se han mantenido para las zonas auxiliares fuera del alcance de los alumnos como los almacenes y se ha fijado un valor de  $2,9E-08 \text{ m}^3/\text{s}*\text{W}$  para la generación de CO<sub>2</sub> de las aulas y zonas comunes ya que el grado de generación de CO<sub>2</sub> de un niño de infantil es considerablemente menor a la de un adulto completamente formado, según la información recogida en *Persily, A., & de Jonge, L. (2017). Carbon dioxide generation rates for building occupants. Indoor Air, 27(5), 868-879.*

Además, se deben introducir dos horarios diferentes para terminar de definir de forma suficiente este apartado. En primer lugar se debe crear **un horario constante para el nivel de actividad** en la pestaña "Schedule:Constant" el cual se define un valor, que al insertarse en el apartado "People" toma de forma predefinida un valor de W/m.

Predeterminadamente, se crea un único horario de este tipo por cada uno de los espacios del edificio y como valor se toman los definidos por el *ASHRAE Handbook of Fundamentals* (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2009.) para condiciones de trabajo ligero sentado para una población equitativa entre hombres y mujeres, todo ello ajustado para representar que la mayor parte de habitantes del edificio son niños con un nivel de actividad ligeramente inferior al de los adultos, por lo que se ha fijado en 100 W/persona.

Degree of Activity		Total Heat, W	
		Adult Male	Adjusted, M/F <sup>a</sup>
Seated at theater	Theater, matinee	115	95
Seated at theater, night	Theater, night	115	105
Seated, very light work	Offices, hotels, apartments	130	115
Moderately active office work	Offices, hotels, apartments	140	130
Standing, light work; walking	Department store; retail store	160	130
Walking, standing	Drug store, bank	160	145
Sedentary work	Restaurant <sup>c</sup>	145	160
Light bench work	Factory	235	220
Moderate dancing	Dance hall	265	250
Walking 4.8 km/h; light machine work	Factory	295	295
Bowling <sup>d</sup>	Bowling alley	440	425
Heavy work	Factory	440	425
Heavy machine work; lifting	Factory	470	470
Athletics	Gymnasium	585	525

Ilustración 41. Ratios representativos a los cuales el calor y la humedad son generados por seres humanos en diferentes estados de actividad ASHRAE Handbook of Fundamentals (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2009.)

Por otra parte, es necesario **introducir el horario de ocupación** del edificio. Este horario, para el cual se emplea el apartado "Schedule:Compact", define para diferentes días característicos como días de diario o fines de semana, en diferentes periodos del año, el porcentaje en tanto por uno de la ocupación máxima total del edificio para cada una de las franjas horarias definidas para estos días tipo.

Para ello se emplean diferentes tipos de funciones que sirven como códigos de programación de estos horarios anuales simplificados, estos siguen un orden cíclico en el cual los niveles inferiores de la lista hacen referencia directa al periodo marcado por los superiores. A continuación, se expresa de forma simplificada el método de funcionamiento de los horarios compactos.

- **Through: "Mes/Día"**, esta función introduce la información de todos los días desde el inicio del año, o el final del último periodo definido con una función "Through", hasta el día del mes indicado tras los dos puntos.
  - **For: "Tipo de día 1, Tipo de día 2..., Tipo de día n"**, para el periodo de tiempo comprendido por la función "Through" precedente, se establece un día tipo para los tipos de día que acompañan a la función "For" tales como Weekdays, Weekends, Días concretos o AllDays para seleccionar todos los tipos.
    - **Until: "Hora"**, después de esta función se añade la fracción de ocupación total desde las 00:00 de la madrugada hasta la hora definida por la función. Si dentro del mismo tipo de día precedido por la función "For" ya hay una función "Until" existente, tomará el periodo de tiempo entre esa función anterior y la nueva; por lo que sucesivas funciones "Until" bajo una misma "For" deben tener una progresión temporal ascendente.
      - **"Fracción de la ocupación"**

Gracias a la información aportada por parte del personal administrativo del centro educativa, se sabe que el colegio abre 9:00 a 17:00, con una pausa de 14:00 a 15:00 durante todo el año, con la excepción de los meses de junio y septiembre, donde se tiene una jornada reducida de 9:00 a 13:00, y los meses de julio y agosto donde el colegio se encuentra cerrado.

Field	Units	Obj1	Obj2	Obj3
Name		OCUP_AULAS	OCUP_COMUN	OCUP_OTROS
Schedule Type Limits Name		Fraction	Fraction	Fraction
Field 1	varies	Through: 5/31	Through: 5/31	Through: 5/31
Field 2	varies	For: Weekdays	For: Weekdays	For: Weekdays
Field 3	varies	Until: 9:00	Until: 9:00	Until: 9:00
Field 4	varies	0	0	0
Field 5	varies	Until: 14:00	Until: 14:00	Until: 14:00
Field 6	varies	.9	.1	.1
Field 7	varies	Until: 15:00	Until: 15:00	Until: 15:00
Field 8	varies	.2	.3	0
Field 9	varies	Until: 17:00	Until: 17:00	Until: 17:00
Field 10	varies	.9	.1	.1
Field 11	varies	Until: 24:00	Until: 24:00	Until: 24:00
Field 12	varies	0	0	0
Field 13	varies	For: Saturday Sund:	For: Saturday Sund:	For: Saturday Sund:
Field 14	varies	Until: 24:00	Until: 24:00	Until: 24:00
Field 15	varies	0	0	0
Field 16	varies	Through: 6/30	Through: 6/30	Through: 6/30
Field 17	varies	For: Weekdays	For: Weekdays	For: Weekdays
Field 18	varies	Until: 9:00	Until: 9:00	Until: 9:00

Ilustración 42. Apartado "Schedule:Compact" con los horarios de ocupación introducidos

Para ello se han definido tres horarios diferentes para las aulas, zonas comunes y otros espacios del edificio como almacenes o aseos, donde la confluencia de gran número de personas es menos habitual. Los horarios empleados definidos con más detalle se exponen con todo lujo de detalles en los anexos situados al final del presente documento.

## Iluminación

A continuación, se procede con el cálculo de las cargas térmicas de iluminación, este parámetro ejerce su influencia debido a que en todos los elementos de la instalación de iluminación del edificio se libera una energía térmica fruto de las pérdidas que estos sistemas tienen en mayor o menor medida en función de la tecnología que empleen.

Para ello se deben modificar los parámetros pertinentes en el apartado "Lights" del software de simulación, el cual presenta un objeto por cada una de las zonas del edificio. Los parámetros de especial importancia son la densidad de potencia instalada en vatios por metro cuadrado y el horario de uso de estos equipos de iluminación.

Field	Units	Obj1	Obj2	Obj3	Obj4	Obj5	Obj6
Name		Luces_AULA 03	Luces_AULA 01	Luces_COMUN 0	Luces_ALMACEN C	Luces_SALA CALD	Luces_ASEO 03
Zone or ZoneList Name		AULA 03	AULA 01	COMUN 0	ALMACEN 01	SALA CALDERA	ASEO 03
Schedule Name		LUZ_EQUIPOS	LUZ_EQUIPOS	LUZ_EQUIPOS	LUZ_EQUIPOS	LUZ_EQUIPOS	LUZ_EQUIPOS
Design Level Calculation Method		Watts/Area	Watts/Area	Watts/Area	Watts/Area	Watts/Area	Watts/Area
Lighting Level	W						
Watts per Zone Floor Area	W/m2	9,6	6,85	3,072	5,33	16	16
Watts per Person	W/person						
Return Air Fraction							
Fraction Radiant		0,72	0,72	0,72	0,72	0,72	0,72
Fraction Visible		0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18
Fraction Replaceable		1	1	1	1	1	1
End-Use Subcategory		General	General	General	General	General	General
Return Air Fraction Calculated from Plenum Temperature		No	No	No	No	No	No
Return Air Fraction Function of Plenum Temperature Co							

Ilustración 43. Apartado "Lights"

Tras una visita al edificio se ha realizado un inventario de las luminarias existentes en el edificio por cada una de las zonas que lo componen, y de esta forma se han identificado tres tipos de lámparas de diferentes potencias y tecnologías distribuidas a lo largo de los espacios de la estructura simulada.

- Tubos fluorescentes de 2x36 W: estas luminarias llevan un par de tubos fluorescentes de 36W y son el tipo de iluminación más extendida en el edificio. Su presencia es especialmente destacable en las aulas y zonas comunes del inmueble.



*Ilustración 44. Luminaria fluorescente 2x36W*

- LEDs de 2x20W, instalados en cada uno de los baños de mayores dimensiones, presentan una luz más clara y un menor consumo que los fluorescentes distribuidos a lo largo del edificio.



*Ilustración 45. Luminaria LED 2x20W*

- Halógenos de 36W, los cuales se hayan en zonas de acceso no habitual como es el caso de los aseos de profesores, almacenes y la sala de calderas entre otros.

Con estos datos recopilados y contabilizados, y ya conocidas las dimensiones de cada uno de los espacios se puede calcular la densidad de potencia instalada en luminarias en cada uno de los espacios del edificio.

## Planta baja

Tabla 8. Densidad de potencia instalada en iluminación por zona de la planta baja

Zona	Área (m2)	Potencia instalada (W)	W/m2
AULA 01	63	432	6,86
AULA 02	63	432	6,86
AULA 03	45	432	9,60
AULA 04	52	432	8,31
COMUN 0	93,75	288	3,07
ASEO 01	13,5	40	2,96
ASEO 02	13,5	40	2,96
ASEO 03	2,25	36	16,00
ALMACEN 01	6,75	36	5,33
ALMACEN 02	27	144	5,33
SALA CALDERA	2,25	36	16,00

## Primera planta

Tabla 9. Densidad de potencia instalada en iluminación por zona de la primera planta

Zona	Área (m2)	Potencia instalada (W)	W/m2
AULA 11	45	432	9,60
AULA 12	52,5	432	8,23
AULA 13	45	432	9,60
AULA 14	63	432	6,86
COMUN 1	87,75	288	3,28
ASEO 11	13,5	40	2,96
ASEO 12	13,5	40	2,96
ASEO 13	2,25	36	16,00
ALMACEN 11	9	36	4,00
TUTORIA	6	36	6,00

Con estos datos ya introducidos, tan solo queda por definir el horario compacto de funcionamiento de estos mediante el apartado "Schedule:Compact" tal y como se hizo con el porcentaje de ocupación de la opción "People".

En el caso del colegio estudiado, no se tiene ningún tipo de temporización de encendido y apagado de los equipos de iluminación, haciéndose el accionamiento de los mismos cuando empieza a haber ocupación en el edificio y apagándose cuando termina la jornada escolar. De tal forma a diferencia del porcentaje de ocupación en este caso se lidia con valores absolutos de encendido o apagado sin haber ningún estado intermedio en el que haya algunas luminarias encendidas y otras no en la misma habitación.

Para simplificar se ha tomado un horario único para todas las zonas en el que las luces se encienden al comienzo de la jornada y se apagan al final de la misma, apagándose durante la pausa para la comida. Este comportamiento no es del todo cierto en zonas donde la ocupación no es habitual como los almacenes o la sala de caldera, pero al ser zonas no climatizadas con poca potencia instalada donde el confort térmico no es la prioridad se asume que no causa una distorsión apreciable en el resultado final.

Este horario se expone de forma detallada en los anexos al final del documento.

### Equipamiento eléctrico

De forma similar a como la instalación de iluminación genera calor debido a las pérdidas que se dan en las conducciones eléctricas de la misma, el resto de equipos eléctricos tienen un efecto sobre el cálculo de las cargas térmicas del edificio.

La propia naturaleza del edificio, al tener un uso enfocado a la enseñanza no se tiene una densidad y variedad de aparatos eléctricos como se puede tener en una oficina. Para poder representar el efecto de estos elementos sobre la demanda térmica del edificio, se ha de calcular la densidad de potencia instalada por metro cuadrado y el horario de uso de los mismos tal y como se ha hecho con la iluminación del edificio.

Field	Units	Obj1	Obj2	Obj3	Obj4
Name		Equipos_AULA 03	Equipos_AULA 01	Equipos_COMUN 0	Equipos_ALMACEN
Zone or ZoneList Name		AULA 03	AULA 01	COMUN 0	ALMACEN 01
Schedule Name		LUZ_EQUIPOS	LUZ_EQUIPOS	LUZ_EQUIPOS	LUZ_EQUIPOS
Design Level Calculation Method		Watts/Area	Watts/Area	Watts/Area	Watts/Area
Design Level	W				
Watts per Zone Floor Area	W/m2	10,66	10,15	0	0
Watts per Person	W/person				
Fraction Latent		0	0	0	0
Fraction Radiant		0,25	0,25	0	0
Fraction Lost		0	0	0	0
End-Use Subcategory		General	General	General	General

Ilustración 46. Apartado "ElectricEquipment"

Para obtener la densidad de potencia instalada se lleva a cabo una visita al edificio, habiéndose identificado tan solo ordenadores y proyectores instalados de forma exclusiva en las aulas del centro educativo. Para los ordenadores se ha tomado el valor medio de 77W presentado en el *ASHRAE handbook - fundamentals, Chapter 18, table 8* (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2009).

Equipment	Description	Nameplate Power Consumption, W	Average Power Consumption, W
Desktop computer <sup>a</sup>	Manufacturer A (model A); 2.8 GHz processor, 1 GB RAM	480	73
	Manufacturer A (model B); 2.6 GHz processor, 2 GB RAM	480	49
	Manufacturer B (model A); 3.0 GHz processor, 2 GB RAM	690	77
Laptop computer <sup>b</sup>	Manufacturer B (model B); 3.0 GHz processor, 2 GB RAM	690	48
	Manufacturer A (model C); 2.3 GHz processor, 3 GB RAM	1200	97
	Manufacturer 1; 2.0 GHz processor, 2 GB RAM, 430 mm screen	130	36
	Manufacturer 1; 1.8 GHz processor, 1 GB RAM, 430 mm screen	90	23
	Manufacturer 1; 2.0 GHz processor, 2 GB RAM, 355 mm screen	90	31
	Manufacturer 2; 2.13 GHz processor, 1 GB RAM, 355 mm screen, tablet PC	90	29
Flat-panel monitor <sup>c</sup>	Manufacturer 2; 366 MHz processor, 130 MB RAM, 355 mm screen)	70	22
	Manufacturer 3; 900 MHz processor, 256 MB RAM (265 mm screen)	50	12
	Manufacturer X (model A); 760 mm screen	383	90
	Manufacturer X (model B); 560 mm screen	360	36
	Manufacturer Y (model A); 480 mm screen	288	28
	Manufacturer Y (model B); 430 mm screen	240	27
	Manufacturer Z (model A); 430 mm screen	240	29
	Manufacturer Z (model C); 380 mm screen	240	19

Ilustración 47. Ganancias térmicas recomendadas de ordenadores típicos ASHRAE Handbook of Fundamentals (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2009.)

Para los proyectores, tras realizar una búsqueda en modelos comerciales más empleados se ha notado que la potencia media de estos aparatos se mantiene alrededor de los 400W durante su uso habitual, pudiéndose considerar este un valor conservador.

En la siguiente tabla se muestra la densidad de potencia instalada por zona teniendo en cuenta que todas las zonas tienen instalados al menos un ordenador y un proyector a excepción de la tutoría donde tan solo hay un ordenador.

#### Planta baja

Tabla 10. Densidad de potencia instalada en equipamiento eléctrico por zona de la planta baja

Zona	Area	Potencia instalada	W/m2
AULA 01	63	640	10,16
AULA 02	63	480	7,62
AULA 03	45	480	10,67
AULA 04	52	480	9,23
COMUN 0	93,75	0	0,00
ASEO 01	13,5	0	0,00
ASEO 02	13,5	0	0,00
ASEO 03	2,25	0	0,00
ALMACEN 01	6,75	0	0,00
ALMACEN 02	27	0	0,00
SALA CALDERA	2,25	0	0,00

## Primera planta

Tabla 11. Densidad de potencia instalada en equipamiento eléctrico por zona de la primera planta

Zona	Area	Potencia instalada	W/m2
AULA 11	45	480	10,67
AULA 12	52,5	480	9,14
AULA 13	45	480	10,67
AULA 14	63	480	7,62
COMUN 1	87,75	0	0,00
ASEO 11	13,5	0	0,00
ASEO 12	13,5	0	0,00
ASEO 13	2,25	0	0,00
ALMACEN 11	9	0	0,00
TUTORIA	6	80	13,33

Finalmente, con respecto a los horarios de uso de estos equipos tampoco se ven controlados por ningún tipo de elemento adicional de la instalación, por lo que los equipos se encenderán o apagarán en función a la ocupación del edificio, por lo que el horario compacto introducido en el apartado “Schedule:Compact” será el mismo empleado para las instalaciones de iluminación, el cual se expone en los anexos a este documento.

## Ventilación

Una de las cargas térmicas más relevantes en un edificio como un centro de enseñanza se ve estrechamente ligado a la ocupación del mismo y a la necesidad de renovar el aire del edificio para mantener una calidad en el ambiente que asegure una salubridad dentro de los espacios del edificio.

Estos datos referentes a las renovaciones de aire de las diferentes zonas del aula se introducen dentro del apartado llamado “DesignSpecification: OutdoorAir” el cual ofrece diferentes métodos de introducción del caudal de ventilación en función de diferentes parámetros, además de requerir un horario de funcionamiento del sistema.

Field	Units	Obj1	Obj2	Obj3	Obj4
Name		Ventilacion_AULA C	Ventilacion_AULA C	Ventilacion_COMUN	Ventilacion_ALMAC
Outdoor Air Method		Flow/Person	Flow/Person	Flow/Person	Flow/Person
Outdoor Air Flow per Person	m3/s-person	0,0125	0,0125	0,0125	0,0125
Outdoor Air Flow per Zone Floor Area	m3/s-m2				
Outdoor Air Flow per Zone	m3/s				
Outdoor Air Flow Air Changes per Hour	1/hr				
Outdoor Air Schedule Name		OCUP_AULAS	OCUP_AULAS	OCUP_COMUN	OCUP_OTROS

Ilustración 48. Apartado “DesignSpecification: OutdoorAir”

Para poder calcular el flujo de refrigeración se han decidido tomar los valores presentes en el *Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios* (Ministerio de Energía, Industria y Comercio, 2013) en metros cúbicos de aire por segundo y persona.

En este se clasifican los edificios en función de su uso teniendo de tal forma unas categorías de aire interior equivalente llamadas "IDA", las cuales definen unos valores mínimos de renovación de aire. Dado que el edificio estudiado está dedicado a la enseñanza este se clasifica dentro de una calidad del aire interior IDA 2, el cual se corresponde con un aire de buena calidad.

IDA 1	<b>Aire de óptima calidad:</b> hospitales, clínicas, laboratorios y guarderías.
IDA 2	<b>Aire de buena calidad:</b> oficinas, residencias (locales comunes de hoteles y similares, residencias de ancianos y de estudiantes), salas de lectura, museos, salas de tribunales, <u>aulas de enseñanza</u> y asimilables y piscinas.
IDA 3	<b>Aire de calidad media:</b> edificios comerciales, cines, teatros, salones de actos, habitaciones de hoteles y similares, restaurantes, cafeterías, bares, salas de fiestas, gimnasios, locales para el deporte (salvo piscinas) y salas de ordenadores.
IDA 4	<b>Aire de calidad baja:</b> no se debe aplicar.

Ilustración 49. Clasificación IDA de calidad del aire interior, *Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios* (Ministerio de Energía, Industria y Comercio, 2013)

Esta clasificación de la calidad del aire, mediante el método indirecto definido en el documento del RITE consultado para esta categorización se corresponde con un caudal de renovación de 12,5 litros por segundo y persona para todas las zonas del edificio.

Categoría	l/s por persona
IDA 1	20
IDA 2	12,5
IDA 3	8
IDA 4	5

Ilustración 50. Ventilación por persona para calidad del aire IDA 2, *Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios* (Ministerio de Energía, Industria y Comercio, 2013)

Con respecto a los horarios de ventilación, al estar estos ligados de forma directa con la ocupación de cada una de las zonas, se han utilizado los horarios compactos de ocupación equivalentes para cada una de las zonas ya que las necesidades de renovación de aire interior se incrementan inevitablemente a medida que crece el número de ocupantes en los espacios del edificio. Estos horarios compactos se incluyen en los anexos del documento.

## Elementos de sombra artificiales

Antes de proceder a la introducción del sistema de climatización del edificio es necesario incluir los elementos de sombra artificiales que rodean al edificio de forma que cuando se evalúe el efecto de las Soluciones Basadas en la Naturaleza se contabilice el efecto que estas ejercen de forma individual.

Para ha sido necesario llevar a cabo una serie de medidas de los edificios que rodean el módulo de enseñanza estudiado, así como la valla que rodea el edificio, con la obtención de los datos apoyada por la información obtenida en la base de datos del catastro.

Para la introducción de estos edificios se ha utilizado la opción de EnergyPlus “Shading: Building: Detailed”, no sin antes realizar una serie de modificaciones y comprobaciones en el elemento de la lista “GlobalGeometryRules”. Es importante emplear la opción detallada de introducción de sombreado ya que así se asegura que su posición no está fijada siendo relativa a la posición del edificio y se moverá con el mismo.

Field	Units	Obj1
Starting Vertex Position		LowerLeftCorner
Vertex Entry Direction		Counterclockwise
Coordinate System		Relative
Daylighting Reference Point Coordinate System		
Rectangular Surface Coordinate System		

Ilustración 51. Apartado "GlobalGeometryRules"

Para ello es importante que el sistema de coordenadas sea relativo al origen del edificio, además de tener en cuenta el vértice que se debe introducir inicialmente para definir geometría manualmente en EnergyPlus, así como la dirección de introducción de vértices, la cual es antihoraria en este caso.

Con esta información tenida en cuenta se introducen los elementos de sombra en el apartado de sombreado del edificio superficie por superficie siguiendo las pautas definidas en la pestaña “GlobalGeometryRules”.

Field	Units	Obj1	Obj2	Obj3	Obj4
Name		E1_S	E1_E	E1_N	E1_O
Transmittance Schedule Name					
Number of Vertices		autocalculate	autocalculate	autocalculate	autocalculate
Vertex 1 X-coordinate	m	-66	-41	-41	-66
Vertex 1 Y-coordinate	m	6	6	22	22
Vertex 1 Z-coordinate	m	0	0	0	0
Vertex 2 X-coordinate	m	-41	-41	-66	-66
Vertex 2 Y-coordinate	m	6	22	22	6
Vertex 2 Z-coordinate	m	0	0	0	0
Vertex 3 X-coordinate	m	-41	-41	-66	-66
Vertex 3 Y-coordinate	m	6	22	22	6
Vertex 3 Z-coordinate	m	30	30	30	30
Vertex 4 X-coordinate	m	-66	-41	-41	-66
Vertex 4 Y-coordinate	m	6	6	22	22
Vertex 4 Z-coordinate	m	30	30	30	30

Ilustración 52. Apartado "Shading: Building:: Detailed"

Tras realizar todo el proceso se tiene puede observar el archivo ".dxf" que genera EnergyPlus, el cual tras simplificar las capas para aliviar el impacto visual se obtiene el resultado observable en la siguiente imagen.

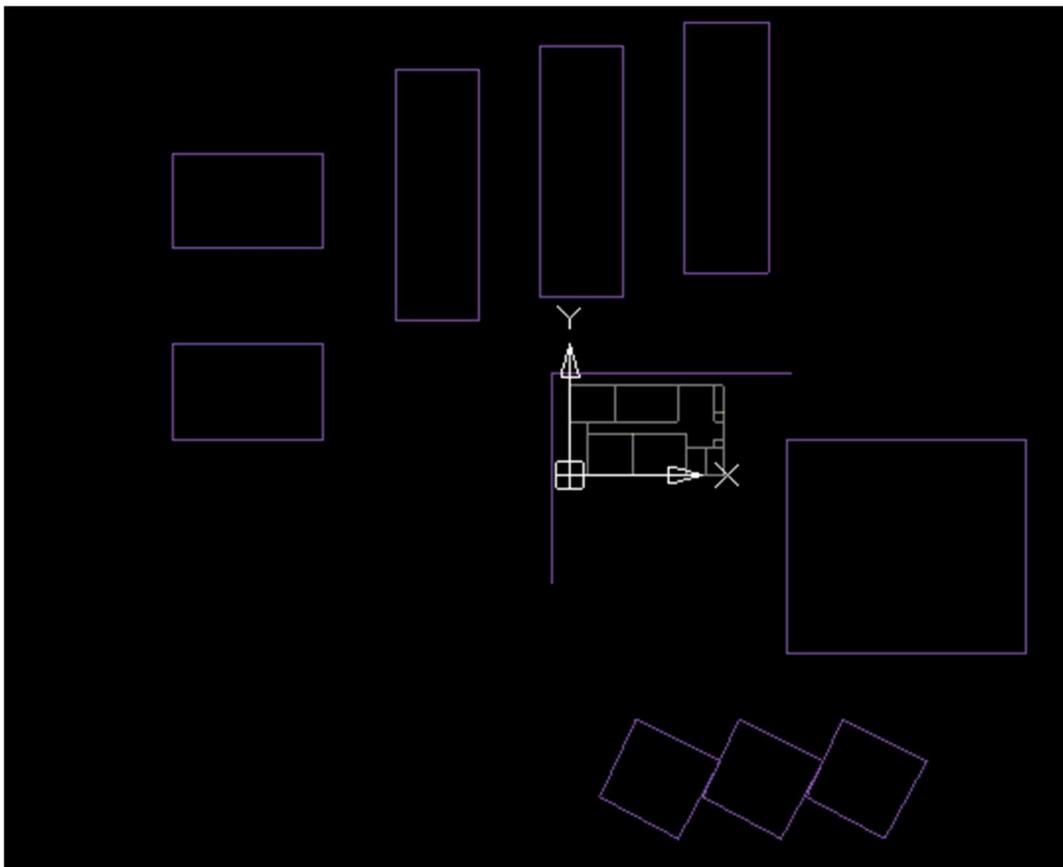


Ilustración 53. plano ".dxf" de la primera planta con la posición de las sombras no naturales

## Introducción del sistema de climatización HVAC

En este apartado, se procede a describir el sistema de climatización que presenta el edificio, así como la metodología empleada para conseguir introducirlo en la simulación del centro educativo simulado mediante EnergyPlus.

Durante una inspección visual del edificio, se ha observado que las zonas climatizadas del edificio se limitan a las 8 aulas de enseñanza que este alberga. El colegio no posee ningún tipo de climatización centralizado, por lo que las tareas de refrigeración y calefacción se realizan mediante unidades Split situadas en la pared noroeste o sureste del edificio, en función de la orientación del aula.



*Ilustración 54. Unidades exteriores de los equipos de climatización del edificio*

Cada una de estas unidades exteriores está conectada a una unidad interior que se encarga de climatizar el interior del aula, funcionando con R407-C como refrigerante. Es importante anotar, que los equipos cuentan con una elevada longevidad por lo que emplean una tecnología con menores prestaciones que otros equipos más modernos.



Ilustración 55. Unidad interior de los equipos de climatización del edificio

Para la simulación de cada uno de estos sistemas de climatización Split, se necesita hacer uso de dos elementos diferentes de EnergyPlus. Debido a que se tratan de sistemas unitarios con un único terminal por cada bomba de calor, será necesario crear tantos objetos para estos apartados como zonas a climatizar del edificio.

Para obtener los datos precisados por el programa, tan solo se dispone de la información presente en la placa de especificaciones de las unidades interiores, ya que no se tiene acceso a ningún manual más ampliado en formato físico por parte del responsable de mantenimiento del edificio y el modelo empleado no presenta ningún tipo de información tras una búsqueda en la web.



Ilustración 56. Placa de características de la unidad interior

Los elementos necesarios para definir el sistema de climatización son “HVACTemplate: System: UnitaryHeatPump: AirToAir” para definir la bomba de calor de expansión directa que compone el elemento exterior, y “HVACTemplate: Zone: Unitary”, el cual define las unidades interiores. Este sistema incluye un ventilador para circular el aire, un “Heating Coil” de expansión directa y velocidad simple, y un “Cooling Coil” del mismo tipo que el anterior.

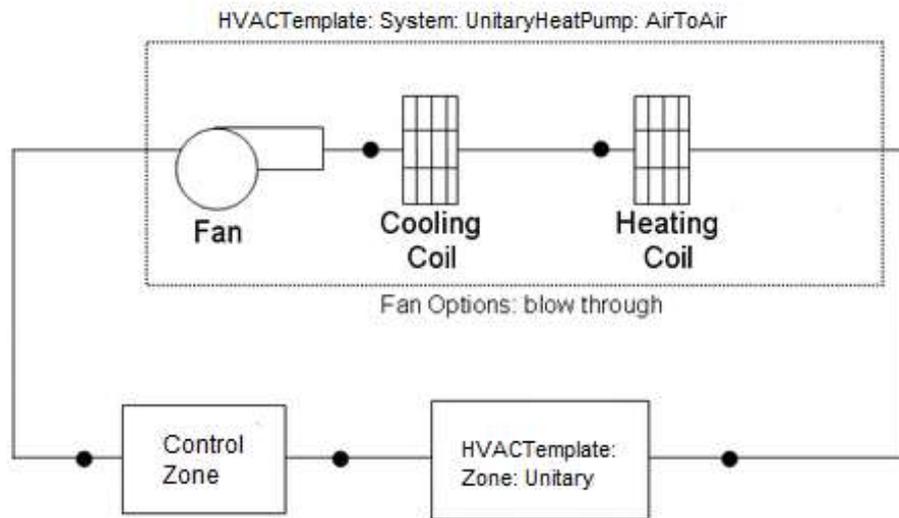


Ilustración 57. Esquema del sistema de climatización empleado

En primer lugar, se parte de la unidad exterior, introduciendo los valores de los cuales se tiene registro, de entre ellos los de más importancia son:

- Los métodos de enfriamiento y calentamiento, ambos “SingleSpeedDX” (expansión directa)
- la zona de control, que en este caso, para cada unidad exterior definida será el aula sobre la cual actúa.
- El modo de operación del ventilador “BlowThrough” (Soplar a través de él)
- La capacidad de refrigeración del “Cooling Coil” que es de 3200 W y su COP de 2,6
- La capacidad de calentamiento del “Heating Coil” que es de 3400 W y su COP de 2,8

Field	Units	Obj1	Obj2	Obj3	Obj4
Name		SPLIT_03	SPLIT_01	SPLIT_02	SPLIT_04
System Availability Schedule Name					
Control Zone or Thermostat Location Name		AULA 03	AULA 01	AULA 02	AULA 04
Cooling Supply Air Flow Rate	m3/s	autosize	autosize	autosize	autosize
Heating Supply Air Flow Rate	m3/s	autosize	autosize	autosize	autosize
No Load Supply Air Flow Rate	m3/s	autosize	autosize	autosize	autosize
Supply Fan Operating Mode Schedule Name					
Supply Fan Placement		BlowThrough	BlowThrough	BlowThrough	BlowThrough
Supply Fan Total Efficiency		0,7	0,7	0,7	0,7
Supply Fan Delta Pressure	Pa	600	600	600	600
Supply Fan Motor Efficiency		0,9	0,9	0,9	0,9
Supply Fan Motor in Air Stream Fraction		1	1	1	1
Cooling Coil Type		SingleSpeedDX	SingleSpeedDX	SingleSpeedDX	SingleSpeedDX
Cooling Coil Availability Schedule Name					
Cooling Design Supply Air Temperature	C	12,8	12,8	12,8	12,8
Cooling Coil Gross Rated Total Capacity	W	3200	3200	3200	3200
Cooling Coil Gross Rated Sensible Heat Ratio		autosize	autosize	autosize	autosize
Cooling Coil Gross Rated COP	W/W	2,6	2,6	2,6	2,6
Heat Pump Heating Coil Type		SingleSpeedDXHeatPump	SingleSpeedDXHeat	SingleSpeedDXHeat	SingleSpeedDXHeat

Ilustración 58. Apartado "HVACTemplate: System: UnitaryHeatPump: AirToAir"

Por otra parte, respecto a las unidades interiores estas se asocian a cada uno de su equivalente exteriores. En este apartado es importante llevar a cabo la **definición del termostato** de las aulas, pues este aspecto determinará el control de los aparatos de climatización, dictando bajo qué condiciones inician o cesan su funcionamiento.

Field	Units	Obj1	Obj2	Obj3	Obj4
Zone Name		AULA 03	AULA 01	AULA 02	AULA 04
Template Unitary System Name		SPLIT_03	SPLIT_01	SPLIT_02	SPLIT_04
Template Thermostat Name		Termostato_AULA	Termostato_AULA	Termostato_AULA	Termostato_AULA
Supply Air Maximum Flow Rate	m3/s	autosize	autosize	autosize	autosize
Zone Heating Sizing Factor					
Zone Cooling Sizing Factor					
Outdoor Air Method		Flow/Person	Flow/Person	Flow/Person	Flow/Person
Outdoor Air Flow Rate per Person	m3/s	0,00944	0,00944	0,00944	0,00944
Outdoor Air Flow Rate per Zone Floor Area	m3/s-m2				
Outdoor Air Flow Rate per Zone	m3/s				
Supply Plenum Name					
Return Plenum Name					
Baseboard Heating Type		None	None	None	None
Baseboard Heating Availability Schedule Name					
Baseboard Heating Capacity	W	autosize	autosize	autosize	autosize
Zone Cooling Design Supply Air Temperature Input Met		SystemSupplyAirTer	SystemSupplyAirTer	SystemSupplyAirTer	SystemSupplyAirTer
Zone Cooling Design Supply Air Temperature	C	12,8	12,8	12,8	12,8
Zone Cooling Design Supply Air Temperature Difference	deltaC	11,11	11,11	11,11	11,11
Zone Heating Design Supply Air Temperature Input Met		SystemSupplyAirTer	SystemSupplyAirTer	SystemSupplyAirTer	SystemSupplyAirTer
Zone Heating Design Supply Air Temperature	C	50	50	50	50

Ilustración 59. Apartado "HVACTemplate: Zone: Unitary"

Debido a que no se tiene ningún tipo de programación que determine de forma automática el arranque de los equipos de climatización y que el control es completamente manual basado únicamente en las condiciones de confort subjetivo de los ocupantes, se ha decidido implementar un termostato en el cual solo se tenga consumo de calefacción durante los meses más fríos, y solo de refrigeración durante los meses más cálidos.

Para ello se comienza creando un objeto dentro de la categoría "HVACTemplate: Thermostat" el cual solicita dos horarios de uso, uno para el enfriamiento y otro para la calefacción. Este apartado también permite fijar una consigna fija si fuera el caso.

Field	Units	Obj1
Name		Termostato_AULA
Heating Setpoint Schedule Name		T_BAJA
Constant Heating Setpoint	C	
Cooling Setpoint Schedule Name		T_ALTA
Constant Cooling Setpoint	C	

Ilustración 60. Apartado "HVACTemplate: Thermostat"

Para ello se crean dos horarios compactos en el apartado "Schedule: Compact", tal y como se hizo con los horarios de ocupación o de uso de iluminación y equipamiento eléctrico. No obstante, en lugar de trabajar con fracciones el tipo de límites establecidos para este horario es del tipo temperatura. Por lo que se define tanto la temperatura que en caso de ser superada activa la refrigeración en el caso del horario "T\_ALTA", como la temperatura que en el caso de caer de esa consigna pone en marcha el modo de funcionamiento de calefacción.

Así pues, se define como temperatura límite de refrigeración 23 grados para los periodos de ocupación de los meses de abril a junio además de septiembre. En los meses restantes, y los periodos de no ocupación, se fija la consigna a 100 grados, temperatura imposible de superar para asegurarse de que el sistema de refrigeración no funciona durante periodos no deseados malgastando así energía.

Para el caso de la calefacción, la temperatura mínima antes de poner en marcha los equipos es de 21 grados para los periodos de ocupación comprendidos entre noviembre y marzo, con un valor de -50 grados en los meses restantes y lapsos de no ocupación para asegurar que el sistema no arranque cuando no es debido.

Estos horarios compactos están incluidos en el anexo presente al final del proyecto.

Tras la realización de todos estos pasos se ha conseguido modelar de forma efectiva el edificio al completo, desde su composición, hasta su equipo de climatización pasando por las diferentes cargas internas que repercuten sobre la demanda máxima de climatización del centro.

A partir de este modelo base, se pueden añadir de forma sencilla diferentes modificaciones para evaluar el impacto energético que estas tienen sobre el consumo del edificio, ya sean Soluciones Basadas en la Naturaleza o actuaciones de otra índole identificadas durante el proceso de modelado del edificio en EnergyPlus o de los resultados aportados por la simulación.

### 2.3.3. Simulación del caso con sombreado natural

Partiendo de los desarrollos llevados a cabo durante la implementación del caso base del apartado anterior, se crea una copia del archivo ".idf" obtenido sobre el cual se añadirá el arbolado circundante que rodea el edificio simulado.

Los resultados obtenidos durante el análisis de los desarrollos obtenidos durante este apartado servirán para poder cuantificar las ventajas energéticas que tienen el sombreado natural, una Solución Basada en la Naturaleza que aporta además numerosas ventajas transversales al ámbito de la eficiencia energética.

Para ello es necesario introducir la geometría de los árboles en el apartado "Shading: Building: Detailed" tal y como se hizo con los elementos de sombra artificiales a lo largo del desarrollo del caso base. Para conseguir ubicar los árboles es necesaria la realización de mediciones en el propio emplazamiento y llevar a cabo una serie de simplificaciones que permitan introducir de forma lo más fiel posible el arbolado cercano.

El edificio está rodeado por tres hileras de árboles que lo rodean a lo largo de sus muros noroeste, suroeste y sureste. Para simplificar la disposición que presentan estos árboles, se ha observado que los árboles tienen un radio de 4 metros con una separación entre ellos inferior a este valor, por lo que, obviando el efecto que puedan tener los troncos de los árboles sobre el consumo energético se puede considerar cada una de las hileras tiene una forma rectangular suspendida a 9 metros del suelo con una altura relativa de 3 metros y un ancho y largo de 8 metros por árbol, empleando el emplazamiento del tronco como centro de la forma, con la posibilidad de superponerse con los árboles adyacentes.

En la siguiente imagen se puede observar una vista en planta del edificio con las hileras de árboles que lo rodean en color morado.

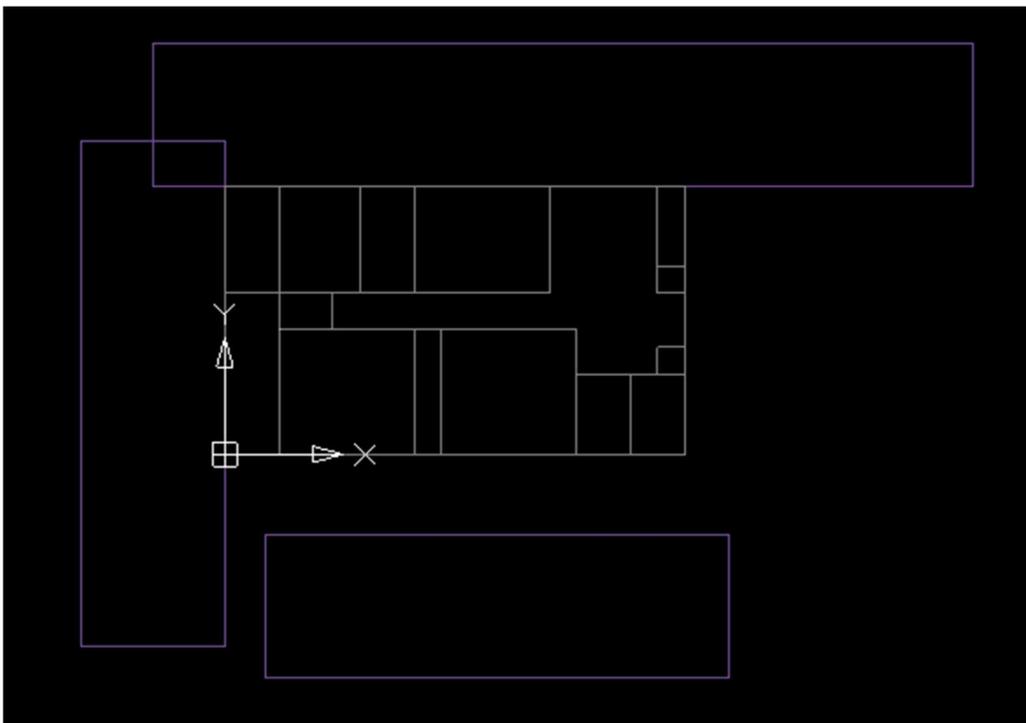


Ilustración 61. plano ".dxf" de la primera planta con los elementos de sombra naturales

Con estos datos y las coordenadas de estas hileras de árboles introducidas en el apartado de sombras del edificio.

Field	Units	Obj48	Obj49	Obj50	Obj51	Obj52
Name		A1_S	A1_E	A1_N	A1_O	A1_T
Transmittance Schedule Name		Trans_Arboles	Trans_Arboles	Trans_Arboles	Trans_Arboles	Trans_Arboles
Number of Vertices		autocalculate	autocalculate	autocalculate	autocalculate	autocalculate
Vertex 1 X-coordinate	m	2,25	28	28	2,25	2,25
Vertex 1 Y-coordinate	m	-12,5	-12,5	-4,5	-4,5	-12,5
Vertex 1 Z-coordinate	m	4	4	4	4	9
Vertex 2 X-coordinate	m	28	28	2,25	2,25	28
Vertex 2 Y-coordinate	m	-12,5	-4,5	-4,5	-12,5	-12,5
Vertex 2 Z-coordinate	m	4	4	4	4	9
Vertex 3 X-coordinate	m	28	28	2,25	2,25	28
Vertex 3 Y-coordinate	m	-12,5	-4,5	-4,5	-12,5	-4,5
Vertex 3 Z-coordinate	m	9	9	9	9	9
Vertex 4 X-coordinate	m	2,25	28	28	2,25	2,25
Vertex 4 Y-coordinate	m	-12,5	-12,5	-4,5	-4,5	-4,5
Vertex 4 Z-coordinate	m	9	9	9	9	9

Ilustración 62. Introducción de las sombras naturales en el apartado "Shading: Building: Detailed"

A diferencia, de con las sombras artificiales las cuales son completamente uniformes e invariables a lo largo del año, los árboles que rodean el edificio son de hoja caduca, por lo que varían su valor de transmitancia a lo largo del año.

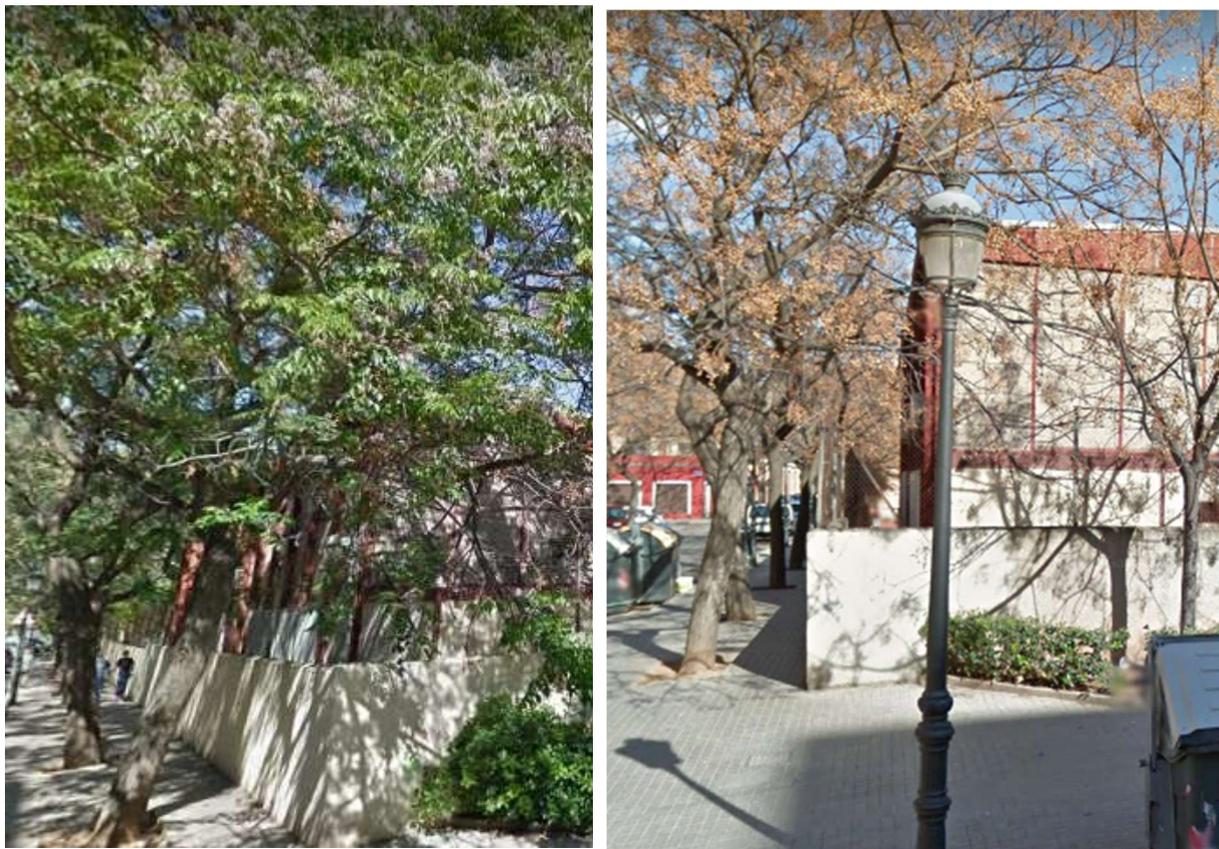


Ilustración 63. Comparación del arbolado entre primavera (izquierda) y otoño (derecha)

Según Hwang, W., Wiseman, P., & Thomas, V. (2015). *Tree Planting Configuration Influences Shade on Residential Structures in Four U.S. Cities. Arboriculture & Urban Forestry*, 41(4), 208-222. se tienen los valores de transmitancia que presentan de forma típica los árboles de hoja caduca a lo largo del año. De tal forma, cuanto más cercano a uno sea el valor de transmitancia, más radiación permite pasar el elemento de sombra, teniéndose de tal forma un valor de 0,825 los meses de noviembre a mayo y de 0,3 el resto del año.

Esta transformación anual se representa mediante un horario compacto de la pestaña “Schedule: Compact” y se presenta detalladamente en los anexos situados al final del documento.

Con los elementos de sombra naturales ya introducidos, se puede proceder a simular el muro verde a instalar en una fracción del muro suroeste evaluando el efecto que este tiene teniendo en cuenta las sombras ya existentes como su efecto como elemento independiente.

#### 2.3.4. Calibración de la transmitancia de los árboles mediante medidas experimentales

A partir de los resultados de la simulación de este caso, y teniendo medidas realizadas in situ de la temperatura de la superficie de la pared exterior suroeste del AULA 13, se puede ajustar el valor de la transmitancia de los árboles para obtener resultados más cercanos a los que se dan en la realidad.

Para ello se ha instalado un sistema de monitorización del estrés térmico de temperaturas superficiales de los muros controlado mediante un microcontrolador Arduino MEGA. En la parte exterior del edificio se instalan 2 sondas de temperatura que registrarán la temperatura del muro exterior.

Cada un tiempo por defecto de 15 minutos, el dispositivo se enciende y mide las variables deseadas, extrae una media, y envía los datos a través de una antena de radiofrecuencia a 433 MHz a otro aparato receptor situado en un lugar cercano, que posteriormente los enviará a una base de datos en Internet. Una vez concluida la transmisión, el aparato se queda en un estado de reposo hasta el siguiente ciclo.

El sistema se alimenta a través de 2 baterías de litio de 3,7 V situadas en el interior de la caja y, al mismo tiempo, dispone de un panel solar de 6 V que carga las baterías durante los periodos de sol. Este sistema se encuentra montado dentro de una caja impresa en plástico en una impresora 3D diseñada a medida. Generalmente, la caja tiene una forma semejante a un prisma triangular para aprovechar la inclinación y mejorar la recepción de luz del panel solar. En la parte superior, se encuentran la antena de radiofrecuencia, los sensores de radiación solar, lluvia y un sensor de temperatura ubicado dentro de un globo metálico negro, en el extremo de un pequeño poste de plástico. En la parte inferior, dentro de un cilindro de plástico con ranuras de ventilación, se encuentran otros dos sensores de temperatura, uno de humedad, uno de presión y uno de viento. Además, en la versión completa, montan en la parte inferior un anemómetro negro de copas.



*Ilustración 64. Sensor de medición exterior*

El dispositivo está anclado utilizando cuatro tacos de 6 milímetros de diámetro y tornillos de 30 mm de longitud.

Una vez definido el aparato encargado de recoger las mediciones llevadas a cabo es necesario llevar a cabo la instalación de las sondas de medición exterior. Este montaje está compuesto por tres elementos en el orden descrito:

- **Sonda de temperatura estanca**, modelo DS18B20. Cuenta con una longitud de 1 metro, cuenta con un rango de funcionamiento entre  $-55^{\circ}\text{C}$  a  $125^{\circ}\text{C}$  y un error de  $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$  en un rango de entre  $-10^{\circ}\text{C}$  a  $85^{\circ}\text{C}$



*Ilustración 65. Sonda de temperatura*

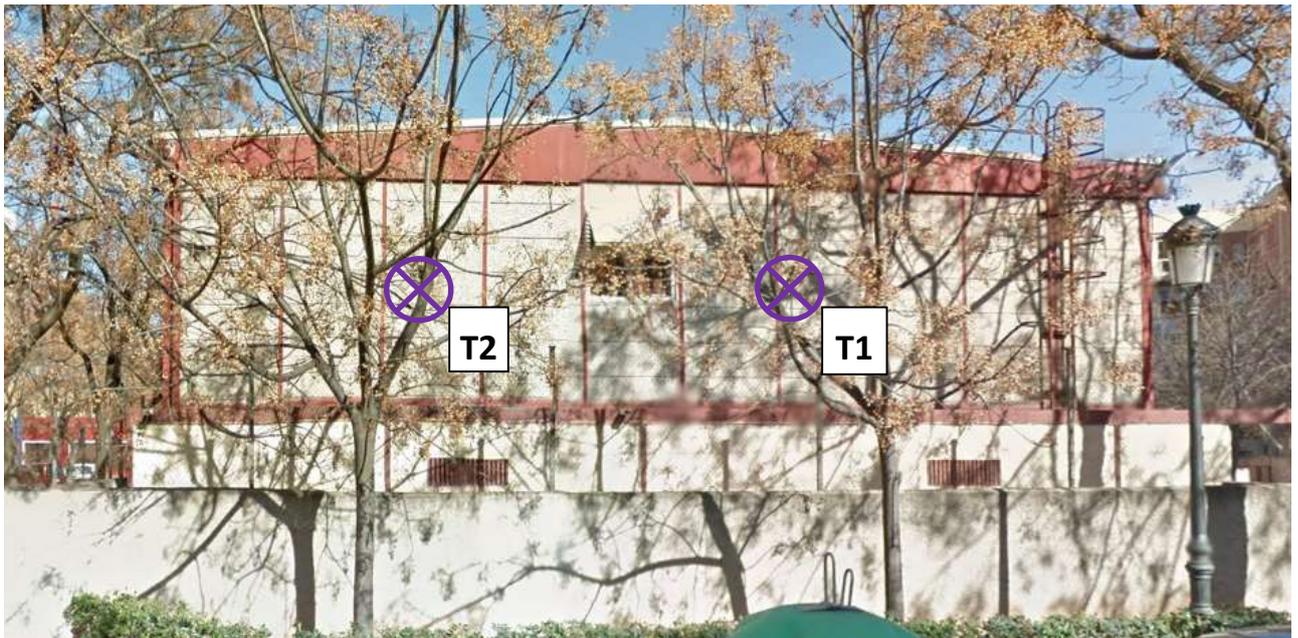
*(<https://electronicagimeno.com/ds18b20-sonda-de-temperatura-estanca-1mt>)*

- **Cinta aislante para tuberías Armaflex L414:** con una anchura de 50 milímetros y un espesor de 3 milímetros



*Ilustración 66. Cinta aislante Armaflex*

- **Cinta de aluminio** con 75 milímetros de ancho y un espesor de 5 milímetros



*Ilustración 67. Ubicación de las dos sondas de temperatura*

Para realizar este montaje se ha seguido la metodología recogida en el Anexo F de la norma UNE EN ISO 7726 para la medición de temperaturas superficiales. Esta indica que los instrumentos empleados para este tipo de mediciones deben ser termómetros de contacto como resistencias o termopares (el caso de este proyecto) o sensores infrarojos.

La sonda de temperatura se pone en contacto con la superficie a medir, para ello se debe asegurar que la transmisión de calor entre el sensor y la superficie sea mayor entre el sensor y el ambiente. Para ello se aumenta el contacto entre la superficie y el sensor mediante pasta conductora la cual va aislada mediante el armaflex y la cinta de aluminio.



*Ilustración 68. Detalle de ambos sensores y la estación de medida*



*Ilustración 69. Detalle de la sonda de temperatura 2*

El sistema de medición ha recogido datos en el periodo comprendido entre el 2 de junio de 2019 a las 00:12 hasta el día 17 de julio a las 13:05. Para ello se han ubicado los dos sensores presentados en las imágenes anteriores de forma que el sensor 1 esté ubicado en una franja sombreada mientras que el sensor 2 está situado en un hueco donde le incide el sol de forma directa.

Para ello se van a comparar la media de las temperaturas registradas en el periodo entre las 14:00 y las 15:00 durante el mes de junio, en primer lugar, para el modelo simulado sin sombras y los datos medidos en el sensor 2 (el que está sin sombra), y después se observará la diferencia que hay entre el resultado de la simulación con sombras y la media de los datos medidos por el sensor 1 y 2, ya que con ambos se tienen en cuenta tanto las zonas del muro suroeste donde la densidad del follaje es mayor y donde es menor.

*Tabla 12. Comparación entre datos medidos y simulados / efecto de la calibración*

	PROMEDIO simulación	PROMEDIO mediciones	Desviación	Porcentaje
<b>Sin sombra 14-15</b>	40,05	39,80	0,03	0,62%
<b>Sombreado 14-15</b>	36,31	34,00	2,69	6,38%
<b>Sombreado 14-15 calibrado</b>	34,51	34,00	0,13	1,50%

De los datos obtenidos se observa que las temperaturas medias exteriores de la superficie donde están instalados los sensores en el caso en que no está sombreada son muy similares, demostrando que la orientación y la composición del edificio son similares a los datos reales.

No obstante, se observa que el valor obtenido en la simulación de la zona sombreada contra el resultado medido es cerca de 6,5% menor. Lo que demuestra que hay ciertos factores que se pueden calibrar para conseguir un resultado más realista.

Para ello se ha llevado a cabo un ajuste modificando la transmitancia de los árboles durante los meses cálidos de 0,3 a 0,15. Tras simular con estos valores se observa que se tienen unos valores mucho más ajustados a los reales. No obstante, tras una visita al emplazamiento se observa que la densidad de las copas de los árboles no es lo suficientemente grande para justificar una transmitancia de los mismos de 0,15, por lo que para conseguir una calibración del modelo fiel a la realidad se necesitan llevar a cabo estudios y mediciones para definir correctamente la altura y geometría de los elementos de sombra para reflejar de manera más fiel su aspecto heterogéneo, la conductividad de los cerramientos, las discrepancias entre las temperaturas interiores esperadas y las llevadas a cabo en la realidad, así como las discrepancias entre la radiación incidente, velocidad del viento y temperatura ambiente entre los días del archivos meteorológico de la simulación y los efectivamente medidos.

Debido a que no se dispone de los medios necesarios para obtener algunos de estos parámetros, y que la calibración de los aparatos de medida disponibles no aporta medidas fiables de temperatura exterior, velocidad del viento y radiación; sería necesaria la realización de un estudio a fondo de todas las variables involucradas en esta calibración para aportar resultados fiables y correspondientes con los dados en la realidad.

Por ello se han decidido mantener los valores de transmitancia elegidos en un principio por ser más representativos con la apariencia real de los elementos de sombreado ya que el uso de un valor menor

como el llevado a cabo en la calibración podría ser perjudicial para evaluar el impacto real que tiene el muro verde sobre la fachada, aportando una sombra excesiva que perjudicaría su verdadero impacto.

### 2.3.5. Simulación del caso con muro verde

En este apartado se lleva a cabo la simulación desde el punto de vista energético de la instalación prevista de la Green Wall a realizar en parte del segundo piso de la fachada suroeste del edificio. Este elemento, tiene su instalación prevista en la fracción del primer piso de la cara suroeste del edificio correspondiente con el AULA 13 según la nomenclatura empleada en el proyecto, y aunque la función principal por la cual se ha decidido llevar a cabo la futura instalación de esta Solución Basada en la Naturaleza es la de depuración de aguas, se ha procedido a la simulación energética del mismo para evaluar la reducción demanda que esta produce en el edificio.

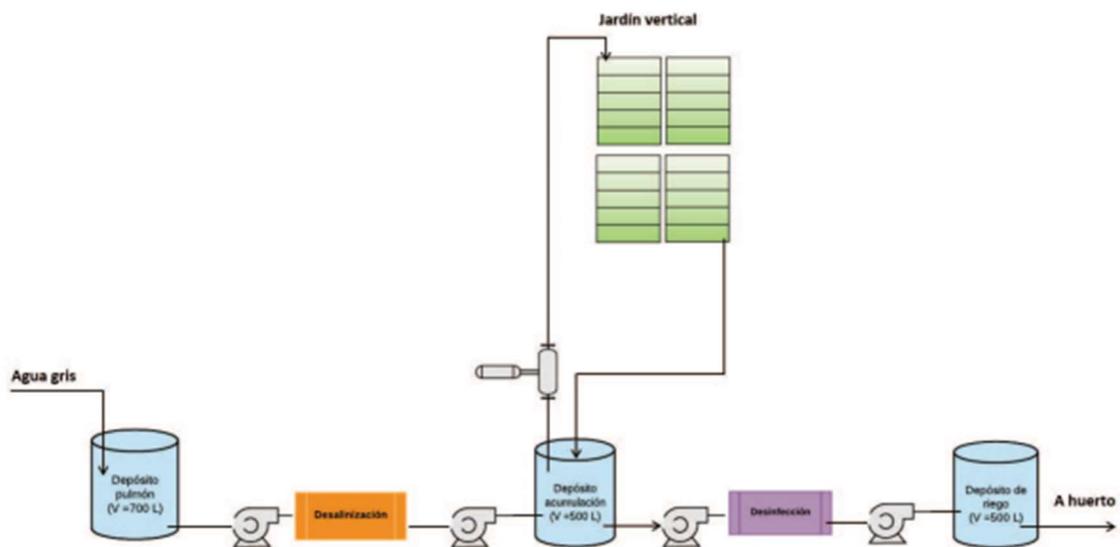


Ilustración 70. Sistema de filtrado a implementar mediante la Green Wall (GrowGreen, 2018)

Debido a que EnergyPlus no presenta ningún tipo de método de introducir un muro verde de forma directa desde una opción dedicada a ello, es necesario simular un elemento que mantenga el máximo de similitudes desde el punto de vista del balance térmico que un muro verde real. Para ello, ha sido necesaria la recopilación y análisis de toda la información posible de precedentes a la simulación energética de este tipo de elementos manteniendo un desarrollo paralelo que pueda adecuar estas metodologías a las características de la instalación basada en la naturaleza a realizar.

Como es posible introducir esta Solución Basada en la Naturaleza de forma predeterminada en el software, ha sido necesario partir de uno de los pocos precedentes documentados de tal desarrollo, siguiendo la metodología empleada para la simulación de una Green Wall en EnergyPlus recogido en la bibliografía Larsen, S., Filippín, C., & Lesino, G. (2014). *Thermal Simulation of a Double Skin Façade with Plants. Energy Procedia*, 57, 1763-1772. Para poder identificar las herramientas disponibles en el software de simulación que permitan un acercamiento similar al de un muro verde es necesario comprender los elementos involucrados en la transmisión de calor a través de un muro verde.

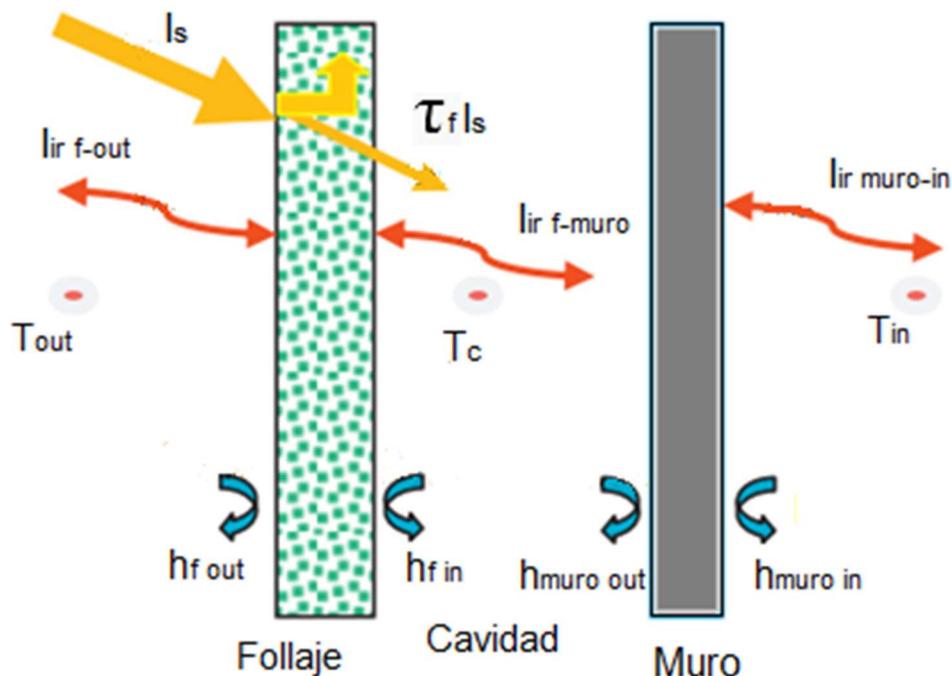


Ilustración 71. Mecanismos de transmisión de calor en un muro verde,

Larsen, S., Filippín, C., & Lesino, G. (2014). Thermal Simulation of a Double Skin Façade with Plants. *Energy Procedia*, 57, 1763-1772

La dificultad de llevar a cabo la simulación de una fachada verde deriva del hecho de que su balance energético depende tanto de parámetros físicos como biológicos. Los procesos de transmisión de calor que participan en el balance energético del follaje del muro verde son los siguientes:

- Absorción de la radiación
- Intercambio de calor sensible por convección entre el elemento vegetal de la Green Wall y el aire exterior
- El intercambio de energía infrarroja entre la vegetación y su entorno
- El calor latente liberado por la planta mediante su transpiración
- El almacenamiento de energía en sus tejidos
- Conducción de calor a través de la hoja, la cual es despreciable
- Energía empleada en procesos metabólicos o reacciones catabólicas, los cuales se pueden suponer también despreciables

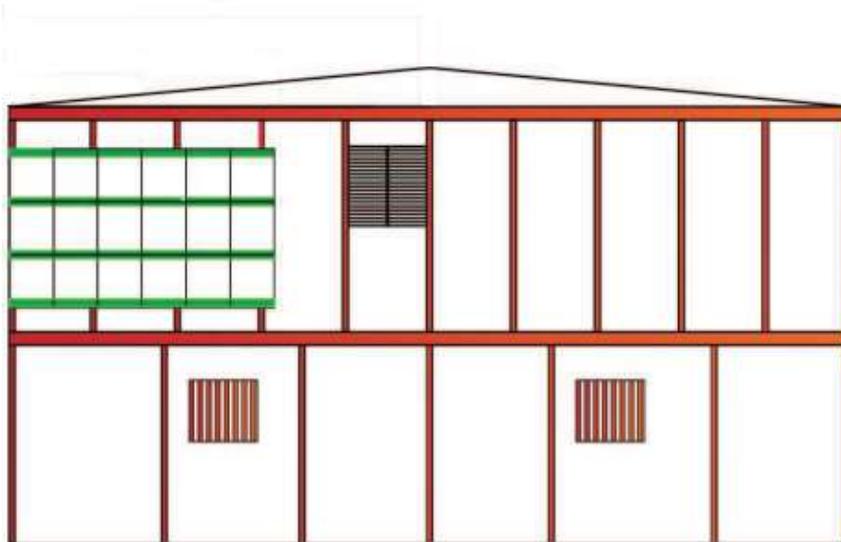
Debido a que la conductividad entre las diferentes hojas del muro verde es tan elevada se pueden suponer ambas caras de cada hoja como si fueran idénticas, pudiendo simplificar el muro verde como una gran hoja desde el punto de vista de su simulación energética, la cual actúa directamente sobre el balance energético del muro o cerramiento sobre los cuales actúa.

De tal forma se forma una cavidad de aire entre la envolvente del edificio y la Green Wall con una temperatura de cavidad  $T_c$ . La radiación solar incidente se absorbe de forma parcial por el follaje, transformándose en parte en calor latente el cual causa que se dé transpiración en la superficie vegetal y en parte en calor sensible el cual incrementa la temperatura del follaje, mientras la fracción restante se transmite a partir del mismo.

Este calor se transmite por convección a ambos lados de la capa vegetal hacia el aire que las envuelve representado con los coeficientes de convección  $h_f$  y  $h_{muro}$ . Finalmente se tiene la transmisión de calor por radiación de la componente vegetal por radiación representado en el esquema presentado previamente con los parámetros  $l_{ir}$ .

Para llevar a cabo la simulación se decide emplear un elemento de sombra del edificio con la misma transmitancia que las plantas que componen la Green Wall, para poder simular el comportamiento del muro verde a instalar.

En primer lugar, se define el muro verde por su geometría, esta se ubica en el muro suroeste en el emplazamiento que se indica en el esquema presentado, y sus dimensiones previstas rondan los 12 m<sup>2</sup>. Ya que no se tienen unas dimensiones especificadas definitivas aparte de la aproximación indicada con anterioridad, se simula un muro verde con una altura de 2,6 metros y un ancho de 4,6 metros separado 20 centímetros de la pared.



*Ilustración 72. Esquema de ubicación de instalación del muro verde*

Así pues, siguiendo la misma metodología empleada para la introducción del resto de elementos de sombreado del edificio, se introducen las coordenadas desde el apartado “Shading: Building: Detailed” siguiendo las especificaciones definidas en la pestaña “GlobalGeometryRules”

Field	Units	Obj1
Name		GW_151
Transmittance Schedule Name		GW_Perenne
Number of Vertices		autocalculate
Vertex 1 X-coordinate	m	2,8
Vertex 1 Y-coordinate	m	15
Vertex 1 Z-coordinate	m	3,2
Vertex 2 X-coordinate	m	2,8
Vertex 2 Y-coordinate	m	10,4
Vertex 2 Z-coordinate	m	3,2
Vertex 3 X-coordinate	m	2,8
Vertex 3 Y-coordinate	m	10,4
Vertex 3 Z-coordinate	m	5,8
Vertex 4 X-coordinate	m	2,8
Vertex 4 Y-coordinate	m	15
Vertex 4 Z-coordinate	m	5,8

Ilustración 73. Introducción de la geometría del muro verde en el apartado "Shading: Building: Detailed"

Adicionalmente, dentro de este mismo apartado, se puede aportar un horario de transmitancia para el muro verde, siendo este un punto que plantea diferentes acercamientos para poder evaluar qué tipo de vegetación sería la más beneficiosa desde el punto de vista meramente del análisis energético de la actuación; ¿hoja perenne, hoja caduca o una mezcla de ambas?

Para ello se han definido tres casos de simulación del muro verde para simulaciones en las que se tenga en cuenta el efecto único del muro verde sin la intromisión de otras sombras circundantes, y otros tres casos para cada tipo de vegetación en el caso en el que se evalúa el efecto conjunto del muro verde con los elementos de sombreado natural ya existentes en las inmediaciones.

Los diferentes horarios compactos del apartado "Schedule: Compact" se incluyen en el anexo situado al final del proyecto.

Para añadir un mayor grado de detalle se pueden introducir valores constantes de la reflectividad visible y la reflectividad solar. Para ello se introduce un nuevo objeto en el apartado "ShadingProperty: Reflectance", para ello se asocian al elemento de sombra que representa el muro verde los valores mencionados con anterioridad.

Field	Units	Obj1
Shading Surface Name		GW_151
Diffuse Solar Reflectance of Unglazed Part of Shading		0,3
Diffuse Visible Reflectance of Unglazed Part of Shading		0,09
Fraction of Shading Surface That Is Glazed		
Glazing Construction Name		

Ilustración 74. Apartado "ShadingProperty: Reflectance"

Estos valores han sido obtenidos de otros estudios realizados sobre plantas similares a las empleadas en muros verde como se ve recogido en las referencias *Oliver, J., & Oke, T. (1979). Boundary Layer Climates. Geographical Review, 69(4), 486* y *Victorero, F., Vera, S., Bustamante, W., Tori, F., Bonilla, C., Gironás, J., & Rojas, V. Experimental Study of the Thermal Performance of Living Walls Under Semiarid Climatic Conditions.*

Otros de los parámetros que se deben de modificar para conseguir una simulación más veraz del efecto del muro verde sobre la demanda energética de climatización del edificio es el coeficiente de

convección de la superficie sobre la cual se instala el muro ajardinado. Esto es debido a que se produce una reducción de la velocidad del viento en contacto con el muro a sombrear ya que el muro verde actúa como un obstáculo para el mismo.

Para obtener este valor de convección modificado para el muro es necesario llevar a cabo de forma previa un estudio dedicado al cálculo del efecto que un muro verde tiene sobre la velocidad del viento sobre la superficie a la que sombrear.

Diversas fuentes como *Dover, J. (2015). Green Infrastructure Incorporating Plants and Enhancing Biodiversity in Buildings and Urban Environments. Taylor and Francis* o *Oosterlee, J. (2013). Green walls and building energy consumption (Master). Eindhoven University of Technology*, sugieren que la velocidad del viento en los muros tras atravesar el muro verde presenta una caída cercana a la mitad de su valor inicial. Sin embargo, en las páginas 37 y 38 de la última bibliografía citada se muestra una metodología para calcular de forma más detallada la caída de velocidad del viento en el muro verde que permite además realizar una discriminación entre jardines verticales con diferentes tipos de vegetación.

Estas correlaciones han sido empleadas de forma extensiva para aplicaciones en edificios quedando recogidas en el documento de referencia donde han sido obtenidas las fuentes originales de cada una de estas fórmulas.

A continuación, se muestra la fórmula empleada para el cálculo de la velocidad del viento reducida sobre la superficie afectada.

*Ecuación 1. Ecuación de la velocidad del viento reducida*

$$W_f = 0.83 \cdot \sigma_f \cdot W \cdot \sqrt{C_{hnf}} + (1 - \sigma_f) \cdot W$$

- $W_f$ : Velocidad tras el follaje en m/s
- $\sigma_f$ : Cobertura fraccional del follaje
- $W$ : Velocidad del viento medida en frente del follaje en m/s
- $C_{hnf}$ : Coeficiente de transferencia casi neutral en el follaje

Con el valor de la cobertura fraccional del follaje determinada por la siguiente fórmula, la cual está relacionada con la densidad de la vegetación

*Ecuación 2. Ecuación de la cobertura fraccional del follaje*

$$\sigma_f = \frac{LAI_f}{7}$$

- $\sigma_f$ : Cobertura fraccional del follaje
- $LAI_f$ : Índice del área de la hoja del follaje

Un factor que se reduce cuando el viento atraviesa el muro verde es el coeficiente de transferencia en situaciones de estabilidad atmosférica casi neutrales, el cual depende principalmente del espesor de la vegetación y la distancia del muro a la distancia de medición del viento.

*Ecuación 3. Ecuación de coeficiente de transferencia casi neutral en el follaje*

$$C_{hnf} = \frac{K_v^2}{\left(\ln\left(\frac{Z_a - Z_d}{Z_o}\right)\right)^2}$$

- $C_{hnf}$ : Coeficiente de transferencia casi neutral en el follaje
- $K_v$ : Constante de Von Karmen (0,4)
- $Z_a$ : Distancia entre el punto de medición del viento y el muro en metros.
- $Z_d$ : Altura de desplazamiento nulo en metros
- $Z_o$ : Escala de la longitud de la dureza del follaje en metros

Con:

*Ecuación 4. Ecuación de la altura de desplazamiento nulo*

$$Z_d = 0,701 \cdot Z_f^{0,979}$$

- $Z_d$ : Altura de desplazamiento nulo en metros
- $Z_f$ : Altura media del follaje en metros

Y:

*Ecuación 5. Ecuación de la escala de la longitud de la dureza del follaje*

$$Z_o = 0,131 \cdot Z_f^{0,997}$$

- $Z_o$ : Escala de la longitud de la dureza del follaje en metros
- $Z_f$ : Altura media del follaje en metros

Al final se tiene una serie de relaciones de las cuales tan solo se necesitan saber cuatro parámetros los cuales han sido obtenidos o estimados mediante los siguientes métodos.

- **Velocidad del viento:** obtenida mediante los resultados obtenidos en la simulación del edificio, debido a que son datos incluidos dentro del archivo meteorológico empleado para la misma.
- **Distancia entre el punto de medición del viento y el muro:** expresada en metros y constante para toda la simulación. Debido a que los valores de viento que se tienen del emplazamiento han sido medidos en una estación alejada de obstáculos se ha tomado un valor constante de

un metro tal y como viene representado en la bibliografía citada debido a que es una distancia suficiente para obviar las perturbaciones producidas por el propio edificio.

- **Índice del área de la hoja del follaje (LAI):** Debido a que la Green Wall a implementar está todavía en fase de diseño no se tienen unos valores medidos reales del índice del área del follaje, se han contrastado diferentes publicaciones recogidas en la bibliografía del documento para contrastar valores típicos para este parámetro en muros verdes de condiciones similares al simulado en el presente proyecto.

Este parámetro tiene además la peculiaridad de que su valor varía a lo largo del año en el caso de emplear un muro vegetal con plantas caducas o una mezcla de caducas y perenne. Para ello se ha observado la evolución de índice del área de la hoja del follaje a lo largo del año en *Gond, V., de Pury, D., Veroustraete, F., & Ceulemans, R. (1999). Seasonal variations in leaf area index, leaf chlorophyll, and water content; scaling-up to estimate fAPAR and carbon balance in a multilayer, multispecies temperate forest. Tree Physiology, 19(10), 673-679.* Y ajustado para los valores de LAI empleadas en los muros verdes.

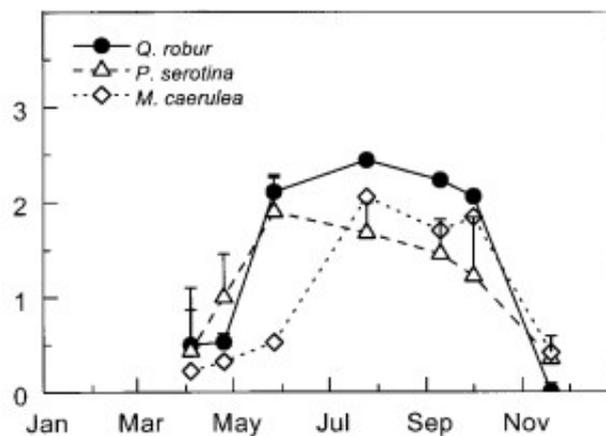


Ilustración 75. Evolución de LAI a lo largo del año para diversas plantas caducas, *Gond, V., de Pury, D., Veroustraete, F., & Ceulemans, R. (1999). Seasonal variations in leaf area index, leaf chlorophyll, and water content; scaling-up to estimate fAPAR and carbon balance in a multilayer, multispecies temperate forest. Tree Physiology, 19(10), 673-679*

Para el caso de la combinación de plantas caducas y perennes se ha calculado un promedio entre el LAI de las plantas caducas y las perennes para la misma época del año. Asumiendo una proporción homogénea de ambos tipos de plantas.

- **Altura media del follaje:** expresada en metros y dependiente de la época del año para los casos que empleen alguna proporción de plantas caducas. Para ello se han tomado valores típicos para otros muros verdes instalados en localizaciones similares y se ha modificado su valor de forma directa con la evolución de LAI, pues ambos son valores dedicados a definir la densidad de follaje del muro verde.

Para obtener el valor del coeficiente de convección para el muro afectado por la Green Wall se ha intentado realizar una estimación empleando las fórmulas incluidas en diferentes referencias de la bibliografía previamente presentada y el RITE, pero ninguna de ellas presentaba un comportamiento uniforme y mantenían una desviación importante con respecto al valor calculado directamente por EnergyPlus.

Para ello se ha observado que los valores de los coeficientes de convección en las superficies siguen una distribución con unas tendencias muy similares a la de la velocidad del viento en el emplazamiento. Para demostrar la correlación se han introducido los valores de velocidad del viento del archivo meteorológico empleado en la simulación del edificio en otro archivo meteorológico de la ciudad de Valencia. Para realizar esta prueba se ha empleado el software Elements que permite modificar de forma sencilla los archivos meteorológicos compatibles con EnergyPlus.

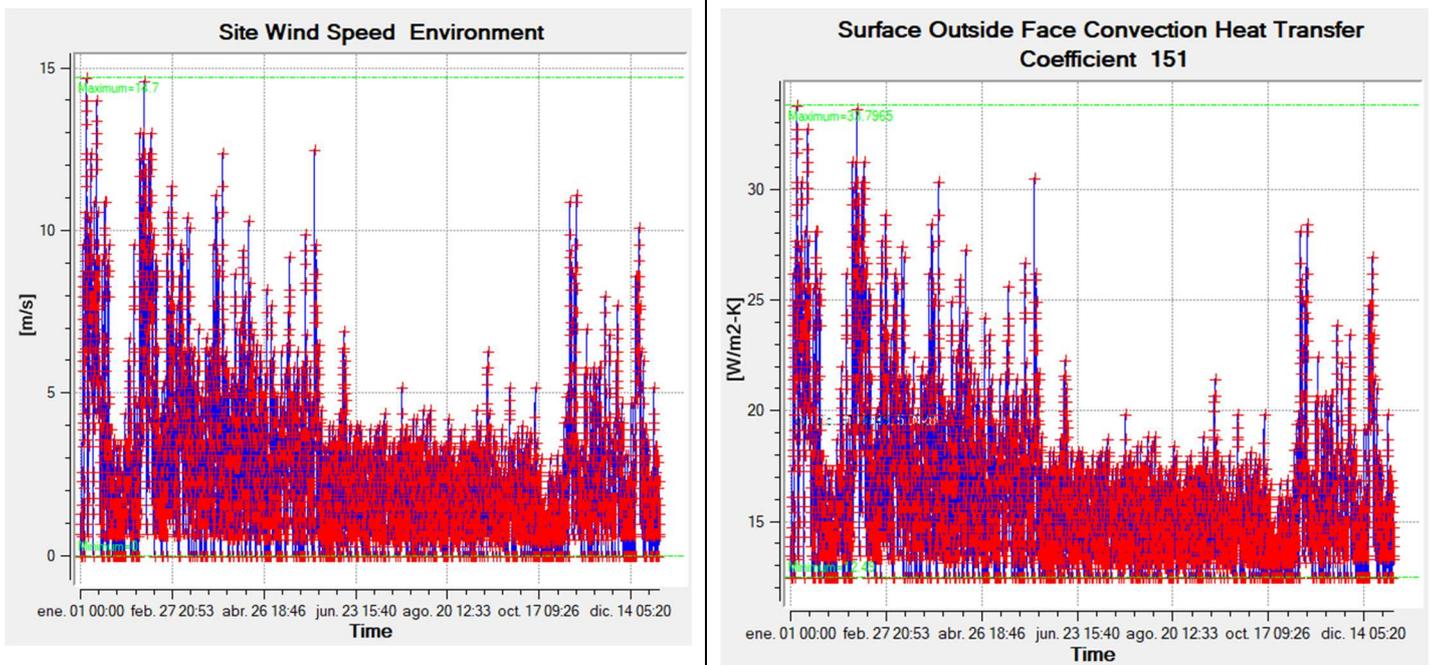


Ilustración 76. Relación entre la velocidad del viento del emplazamiento y el coeficiente de convección de la superficie exterior

Al comprobar los resultados del coeficiente de convección para la superficie estudiada empleando el archivo meteorológico alternativo con la velocidad del viento del archivo empleado en la simulación se comprueba que los valores coinciden, por lo que se puede asumir que el valor de este coeficiente depende directamente de la velocidad del viento.

Siendo coherentes con la metodología de cálculo empleada para el coeficiente de convección de EnergyPlus, y viendo que el cálculo que este realiza depende directamente de la velocidad del viento, se introduce la velocidad del viento reducida en el archivo meteorológico empleado en la simulación para las versiones perennes, caducas y mezcladas, obteniendo el resultado de los coeficientes de convección a lo largo del año para este muro afectado por el muro verde.

## PERENNE

Tabla 13. Cálculo mensual de la reducción de velocidad y coeficiente de convección en una superficie afectada por un muro verde perenne

Mes	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Velocidad del viento (media)	4,173	4,921	3,716	3,474	3,399	3,178	2,944	2,941	2,895	2,15	2,926	2,389
LAI	3,3	3,3	3,3	3,3	3,3	3,3	3,3	3,3	3,3	3,3	3,3	3,3
Distancia entre medicion del viento y la green wall	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Altura/anchura media del follaje	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
Cobertura fraccional del follaje	0,471	0,471	0,471	0,471	0,471	0,471	0,471	0,471	0,471	0,471	0,471	0,471
Near neutral transfer coeficient	0,018	0,018	0,018	0,018	0,018	0,018	0,018	0,018	0,018	0,018	0,018	0,018
Zero displacement height	0,216	0,216	0,216	0,216	0,216	0,216	0,216	0,216	0,216	0,216	0,216	0,216
Foliage roughness length scale	0,039	0,039	0,039	0,039	0,039	0,039	0,039	0,039	0,039	0,039	0,039	0,039
<b>Velocidad en el follaje</b>	<b>2,424</b>	<b>2,859</b>	<b>2,159</b>	<b>2,018</b>	<b>1,975</b>	<b>1,846</b>	<b>1,710</b>	<b>1,708</b>	<b>1,682</b>	<b>1,249</b>	<b>1,700</b>	<b>1,388</b>
Coef de convección en fachada (151)	18,434	19,507	17,761	17,414	17,308	16,992	16,654	16,649	16,585	15,525	16,634	15,87
<b>Coef de convección (EPLUS)</b>	<b>15,918</b>	<b>16,535</b>	<b>15,539</b>	<b>15,335</b>	<b>15,276</b>	<b>15,093</b>	<b>14,9</b>	<b>14,897</b>	<b>14,861</b>	<b>14,245</b>	<b>14,881</b>	<b>14,444</b>

## MEZCLA HOMOGENEA DE CADUCA Y PERENNE

Tabla 14. Cálculo mensual de la reducción de velocidad y coeficiente de convección en una superficie afectada por un muro verde con una mezcla homogénea de hoja caduca y perenne

Mes	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Velocidad del viento (media)	4,173	4,921	3,716	3,474	3,399	3,178	2,944	2,941	2,895	2,15	2,926	2,389
LAI	1,6	1,6	1,6	1,8	2,5	3,3	3,3	3,3	3,3	2,5	1,8	1,6
Distancia entre medicion del viento y la green wall	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Altura/anchura media del follaje	0,15	0,15	0,15	0,22	0,27	0,3	0,3	0,3	0,3	0,27	0,22	0,15
Cobertura fraccional del follaje	0,229	0,229	0,229	0,257	0,357	0,471	0,471	0,471	0,471	0,357	0,257	0,229
Near neutral transfer coeficient	0,011	0,011	0,011	0,014	0,016	0,018	0,018	0,018	0,018	0,016	0,014	0,011
Zero displacement height	0,109	0,109	0,109	0,159	0,195	0,216	0,216	0,216	0,216	0,195	0,159	0,109
Foliage roughness length scale	0,020	0,020	0,020	0,029	0,036	0,039	0,039	0,039	0,039	0,036	0,029	0,020
<b>Velocidad en el follaje</b>	<b>3,302</b>	<b>3,894</b>	<b>2,941</b>	<b>2,669</b>	<b>2,314</b>	<b>1,846</b>	<b>1,710</b>	<b>1,708</b>	<b>1,682</b>	<b>1,464</b>	<b>2,248</b>	<b>1,891</b>
Coef de convección en fachada (151)	18,434	19,507	17,761	17,414	17,308	16,992	16,654	16,649	16,585	15,525	16,634	15,87
<b>Coef de convección (EPLUS)</b>	<b>17,172</b>	<b>18,019</b>	<b>16,646</b>	<b>16,263</b>	<b>15,764</b>	<b>15,093</b>	<b>14,9</b>	<b>14,897</b>	<b>14,861</b>	<b>14,555</b>	<b>15,667</b>	<b>15,153</b>

## CADUCA

Tabla 15. Cálculo mensual de la reducción de velocidad y coeficiente de convección en una superficie afectada por un muro verde caduco

Mes	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Velocidad del viento (media)	4,173	4,921	3,716	3,474	3,399	3,178	2,944	2,941	2,895	2,15	2,926	2,389
LAI	0,5	0,5	0,5	1	1	3,3	3,3	3,3	3,3	2,9	1	0,5
Distancia entre medicion del viento y la green wall	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Altura/anchura media del follaje	0,05	0,05	0,05	0,1	0,13	0,3	0,3	0,3	0,3	0,25	0,1	0,05
Cobertura fraccional del follaje	0,071	0,071	0,071	0,143	0,143	0,471	0,471	0,471	0,471	0,414	0,143	0,071
Near neutral transfer coeficient	0,006	0,006	0,006	0,009	0,010	0,018	0,018	0,018	0,018	0,015	0,009	0,006
Zero displacement height	0,037	0,037	0,037	0,074	0,095	0,216	0,216	0,216	0,216	0,180	0,074	0,037
Foliage roughness length scale	0,007	0,007	0,007	0,013	0,017	0,039	0,039	0,039	0,039	0,033	0,013	0,007
<b>Velocidad en el follaje</b>	<b>3,895</b>	<b>4,593</b>	<b>3,468</b>	<b>3,016</b>	<b>2,954</b>	<b>1,846</b>	<b>1,710</b>	<b>1,708</b>	<b>1,682</b>	<b>1,351</b>	<b>2,541</b>	<b>2,230</b>
Coef de convección en fachada (151)	18,434	19,507	17,761	17,414	17,308	16,992	16,654	16,649	16,585	15,525	16,634	15,87
<b>Coef de convección (EPLUS)</b>	<b>18,029</b>	<b>19,032</b>	<b>17,401</b>	<b>16,757</b>	<b>16,676</b>	<b>15,093</b>	<b>14,9</b>	<b>14,897</b>	<b>14,861</b>	<b>14,411</b>	<b>16,084</b>	<b>15,637</b>

Con estos valores anuales de los coeficientes de convección con velocidad del viento reducida se recogen los coeficientes de convección medios por mes y con ellos se crea un horario compacto en el apartado "Schedule: Compact" para cada una de las opciones de tipo de vegetación empleada.

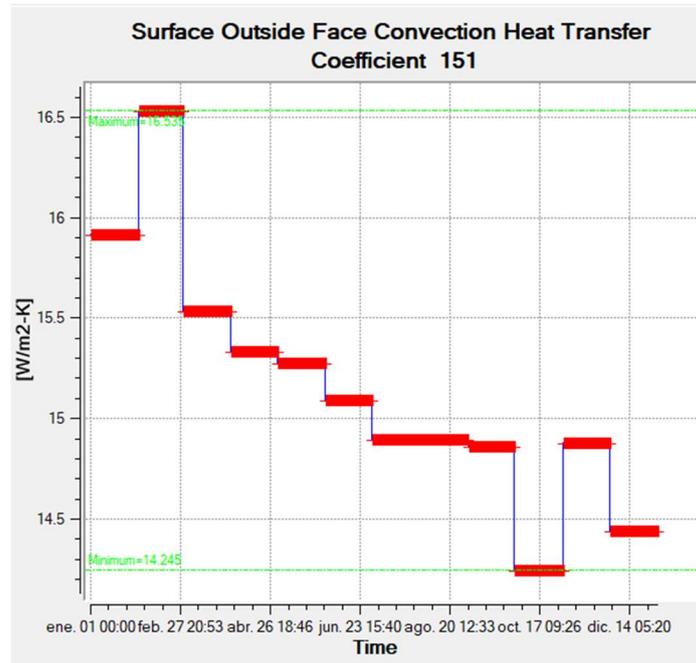


Ilustración 77. Coeficiente de convección en la superficie afectada modificado mediante los cálculos realizados

Estos horarios compactos, los cuales se incluyen en los anexos al documento, se introducen en el nuevo objeto creado en el apartado "SurfaceProperty: ConvectionCoefficients" en el cual se indica la superficie sobre la cual se quiere modificar el coeficiente, se indica el lado del muro sobre el cual se quiere modificar el coeficiente, y el tipo de coeficiente que se va a introducir, en el caso que recoge este proyecto será una de los horarios compactos creados en función del tipo de vegetación empleado.

Field	Units	Obj1
Surface Name		151
Convection Coefficient 1 Location		Outside
Convection Coefficient 1 Type		Schedule
Convection Coefficient 1	W/m²-K	
Convection Coefficient 1 Schedule Name		Conv_Perenne
Convection Coefficient 1 User Curve Name		
Convection Coefficient 2 Location		
Convection Coefficient 2 Type		
Convection Coefficient 2	W/m²-K	
Convection Coefficient 2 Schedule Name		
Convection Coefficient 2 User Curve Name		

Ilustración 78. Apartado "SurfaceProperty: ConvectionCoefficients"

Tras estos pasos el muro verde estaría completamente definido, pudiéndose proceder a la fase de análisis de la simulación realizada y la comparación entre la combinación o el efecto aislado de los diferentes casos propuestos.

## **CAPITULO 3. ANÁLISIS DE LA SIMULACIÓN**

A lo largo de este capítulo se llevará a cabo el análisis del impacto que las diferentes Soluciones Basadas en la Naturaleza implementadas en el edificio tienen sobre la demanda energética del mismo. Para ello se compararán de forma individual y combinado los parámetros de mayor relevancia para evaluar el efecto del sombreado de los árboles circundantes, el efecto de los muros verdes perenne, caducos y combinados con y sin elementos de sombra.

### **3.1. EVALUACIÓN DEL IMPACTO DEL SOMBREADO NATURAL**

Para evaluar el efecto del sombreado natural sobre el edificio se van a tomar diferentes tipos de muros con orientaciones diferentes y se va a evaluar el impacto que tiene el sombreado sobre las temperaturas exteriores de estas superficies, así como el efecto que estas ejercen sobre la potencia media demandada por el equipo de climatización en aulas de diferentes localizaciones y orientaciones del edificio.

En primer lugar, se simula el caso base sin ningún tipo de sombreado natural instalado, para asegurarse que el sistema de climatización funciona como debe ser. Se observa la evolución de la temperatura media del aire en las aulas y se observa si durante las horas de ocupación los límites de temperatura definidos por el horario del termostato se respetan.

Como se puede observar en la siguiente imagen ejemplificativa para el AULA 13, durante los meses de invierno no se baja de una temperatura de 21°C durante las horas de ocupación.

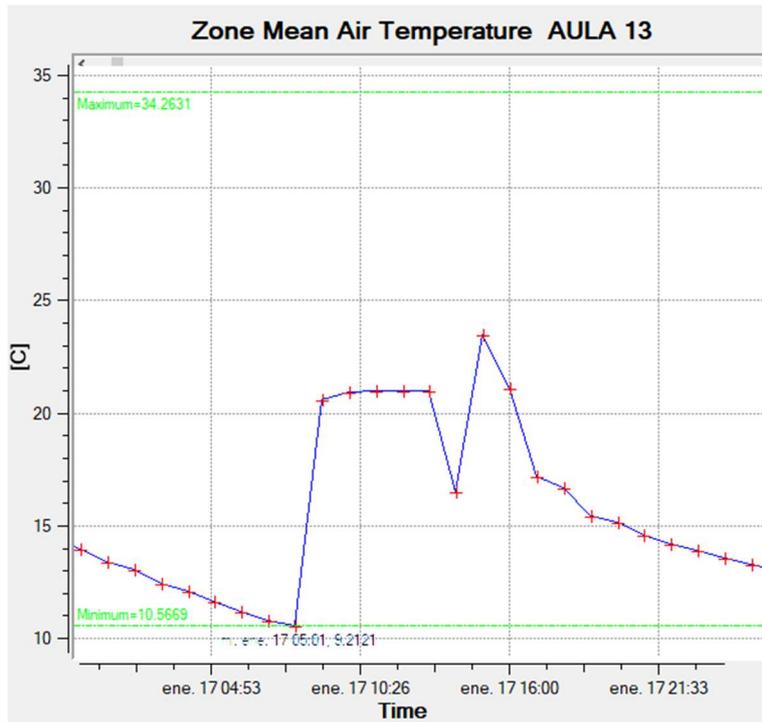


Ilustración 79. Evolución de la temperatura del interior de AULA 13 durante un día laboral de enero

Mientras que, durante un día demostrativo del mes de mayo dentro del horario de uso de refrigeración, se puede observar que durante las horas de uso la temperatura del aire dentro del aula no supera los 23°C.

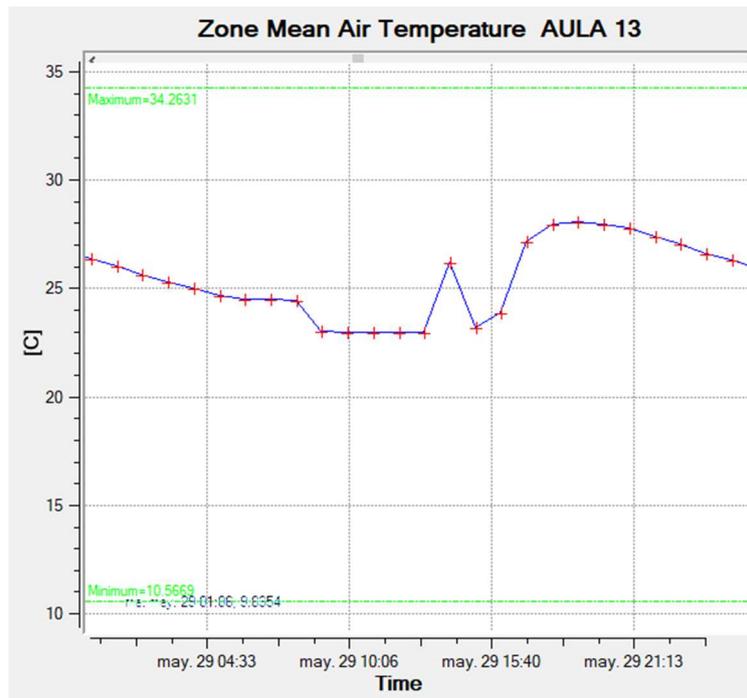
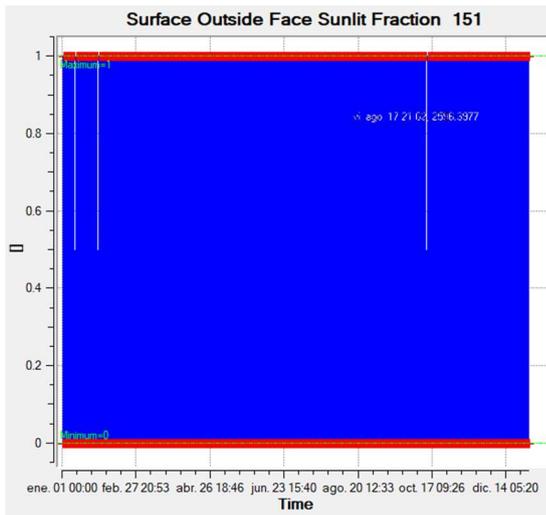
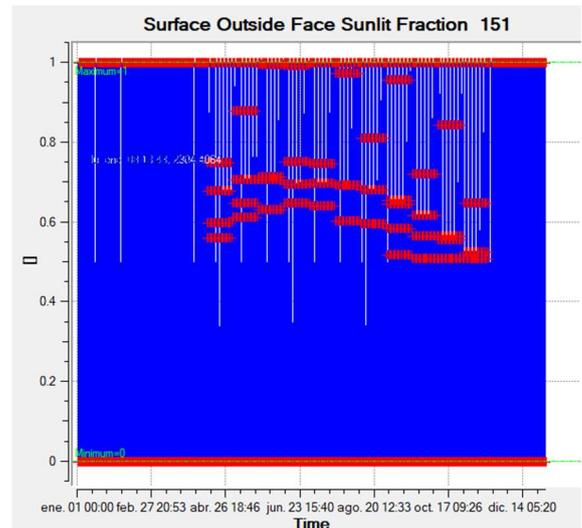


Ilustración 80. Evolución de la temperatura del interior de AULA 13 durante un día laboral de mayo

El efecto del sombreado se puede apreciar observando el porcentaje de la superficie suroeste del AULA 13 que queda sombreada tras introducir el arbolado.



*Base*

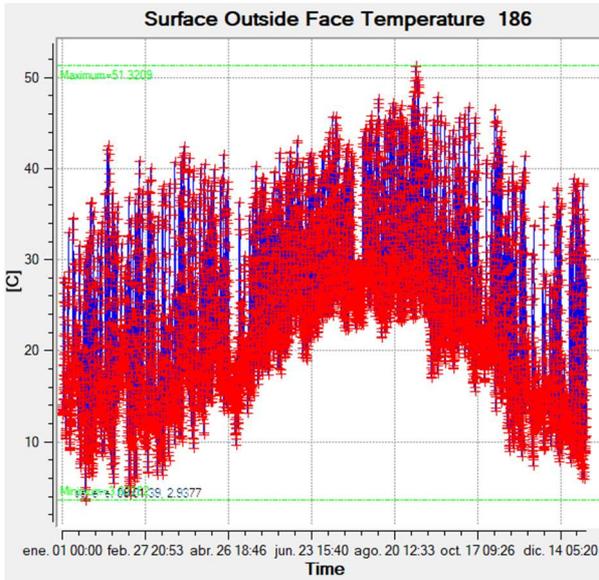


*Sombras*

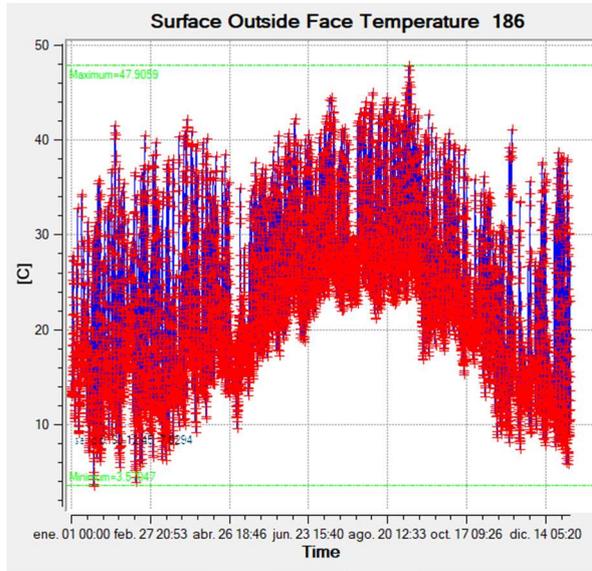
*Ilustración 81. Comparación del porcentaje de la superficie suroeste del AULA 13 iluminada a lo largo de al año para el caso base y el caso con sombreado natural*

Como se observa, el efecto del sombreado natural tan solo tiene lugar a lo largo de la etapa del año el que las temperaturas son más cálidas, coincidiendo además con la época en la que los árboles, de hoja caduca, cuentan con su follaje completamente desarrollado.

Una de las mejoras más directas del sombreado es la reducción de la temperatura de la superficie sombreada debido a la menor radiación que ahora le está afectando. Por ello uno de los parámetros que mejor pueden representar el efecto que el sombreado tiene es la evolución de las temperaturas de diferentes superficies con diversas orientaciones antes y después de tener en cuenta el efecto del arbolado circundante. La reducción de estas temperaturas, se hace más notable durante los meses en los cuales se aprecia un efecto del sombreado natural tal y como se ve en las gráficas de porcentaje de área de la superficie sombreada presentados con anterioridad.



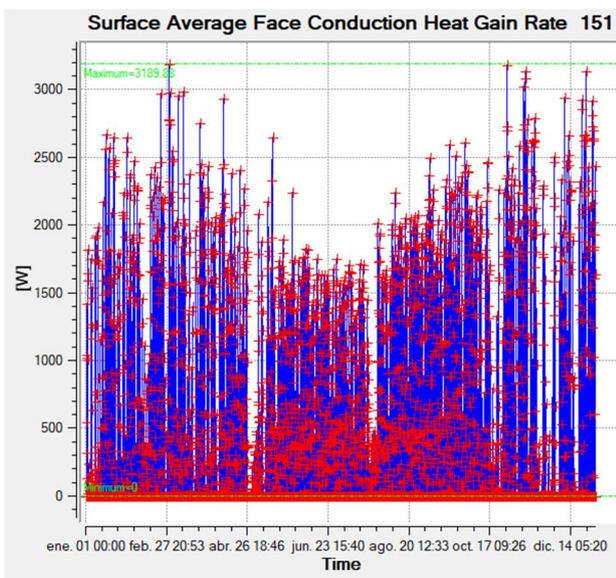
Caso base



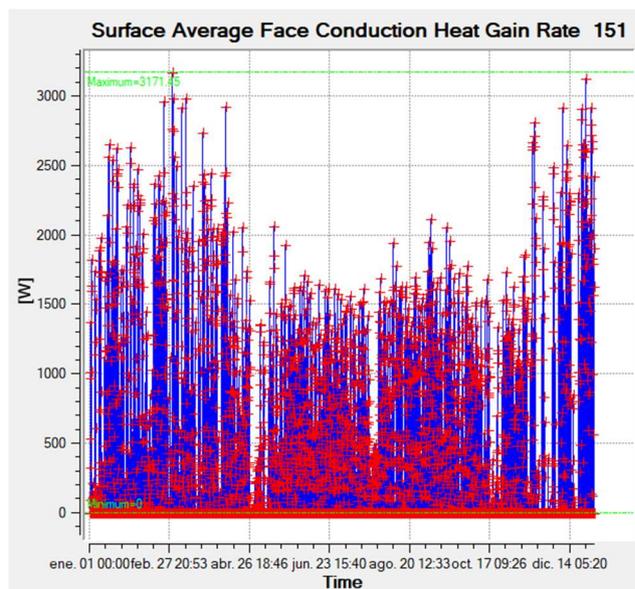
Con sombras

Ilustración 82. Comparación de la temperatura superficial del muro sureste del AULA 12 para el caso base y el caso con sombreado natural

Principalmente, esta reducción de temperatura baja la transmisión de calor a través de las superficies sombreadas hacia el interior de las aulas, a la vez que el arbolado bloquea la radiación que acabaría atravesando los huecos de la envolvente, lo cual contribuye a una reducción de la temperatura interior del espacio sobre el que se somborean sus superficies reduciendo sus necesidades de refrigeración mientras que se aumentan las de calefacción. Tal y como se observa en las gráficas inferiores, las ganancias a través del muro suroeste del AULA 13 se ven reducidas de forma especial durante los meses en los cuales está actuando la sombra del arbolado.



Base



Sombras

Ilustración 83. Comparación de las ganancias por conducción a través de la superficie suroeste del AULA 13 iluminada a lo largo de al año para el caso base y el caso con sombreado natural

No obstante, esta Solución Basada en la Naturaleza tiene beneficios adicionales, entre ellos el hecho de que la reducción de las temperaturas de las superficies sombreadas se traduce en una bajada de la radiación que estas reflejan hacia el exterior, contribuyendo a reducir la temperatura media de las calles mejorando la sensación de confort urbano. Adicionalmente se tienen otras ventajas ajenas a la eficiencia energética de edificios como es el caso de la mejora de la biodiversidad o de la calidad del aire.

En la siguiente tabla se comparan las temperaturas medias para diferentes muros en el caso base del proyecto y en el caso en el que cuentan con sombreado natural. Finalmente se muestra el porcentaje de reducción de temperatura de las superficies, valor el cual es beneficioso durante los meses cálidos y perjudicial durante los más fríos.

Tabla 16. Evolución de las temperaturas superficiales para diferentes muros en el caso base y con sombras naturales

	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
AULA 13: Muro Suroeste	16,23	17,13	18,51	21,33	23,49	29,30	30,75	32,16	29,54	24,95	18,15	15,71
AULA 13: Muro Suroeste (Sombreado)	15,924	16,482	17,723	20,05	21,889	27,246	29,12	29,91	27,403	22,909	16,522	15,344
% de reducción	1,86%	3,80%	4,25%	6,00%	6,82%	7,01%	5,30%	7,00%	7,23%	8,16%	8,97%	2,33%
AULA 13: Muro Noroeste	14,04	14,64	16,03	19,34	22,44	28,19	29,78	29,98	26,74	22,32	15,40	12,72
AULA 13: Muro Noroeste (Sombreado)	13,71	14,19	15,41	18,11	20,48	25,56	27,8	27,85	25,25	21,26	14,87	12,39
% de reducción	2,35%	3,07%	3,87%	6,36%	8,73%	9,33%	6,65%	7,10%	5,57%	4,75%	3,44%	2,59%
AULA 13: Cubierta	15,89	17,53	20,31	24,09	27,51	35,01	35,24	36,42	32,18	25,76	17,81	14,90
AULA 13: Cubierta (Sombreado)	15,8	17,28	20,18	23,69	26,8	34,07	34,51	35,67	31,52	25,09	17,37	14,72
% de reducción	0,57%	1,43%	0,64%	1,66%	2,58%	2,68%	2,07%	2,06%	2,05%	2,60%	2,47%	1,21%
AULA 03: Muro Suroeste	16,64	17,60	18,93	21,66	23,64	29,29	30,56	32,08	29,62	25,06	18,53	16,04
AULA 03: Muro Suroeste (Sombreado)	15,5	16,04	17,35	19,08	20,72	25,68	27,72	28,08	25,83	21,87	15,96	14,6
% de reducción	6,85%	8,86%	8,35%	11,91%	12,35%	12,33%	9,29%	12,47%	12,80%	12,73%	13,87%	8,98%
AULA 11: Muro Noroeste	14,08	14,67	16,07	19,36	22,45	28,18	29,76	29,92	26,67	22,31	15,43	12,73
AULA 11: Muro Noroeste (Sombreado)	13,78	14,27	15,41	18,12	20,47	25,44	27,7	27,76	25,23	21,32	14,95	12,44
% de reducción	2,13%	2,73%	4,11%	6,40%	8,82%	9,72%	6,92%	7,22%	5,40%	4,44%	3,11%	2,28%
AULA 12: Muro sureste	17,10	18,60	19,57	21,72	23,38	28,79	30,59	31,97	29,92	25,12	18,96	16,72
AULA 12: Muro sureste (Sombreado)	13,78	14,27	15,41	18,12	20,47	25,44	27,7	27,76	25,23	21,32	14,95	12,44
% de reducción	19,42%	23,28%	21,26%	16,57%	12,45%	11,64%	9,45%	13,17%	15,68%	15,13%	21,15%	25,60%

Con los siguientes datos recopilados, se puede llevar a cabo un análisis más enfocado a puntos concretos la instalación, obteniendo resultados como cuál es la orientación más acertada o en que meses se tiene una mayor reducción de la temperatura de muro.

A continuación, se muestra la media de porcentaje de reducción de la temperatura para las diferentes épocas del año.

Tabla 17. Porcentaje de reducción de la temperatura para diferentes épocas del año

	Meses cálidos	Meses Fríos
AULA 13: Muro Suroeste	6,56%	4,90%
AULA 13: Muro Noroeste	7,29%	4,90%
AULA 13: Cubierta	2,18%	1,49%
AULA 03: Muro Suroeste	11,86%	9,94%
AULA 11: Muro Noroeste	7,41%	3,13%
AULA 12: Muro sureste	13,16%	20,97%

De los resultados obtenidos se muestra que a excepción de la cubierta, en la cual el efecto del sombreado no se ve tan presente, esta sombra arrojada conlleva una reducción importante de la bajada de la temperatura de las fachadas a lo largo del año.

Se observa que este efecto es de especial importancia en los muros donde hay mayor incidencia de radiación solar debido a su orientación, como es el caso del muro sureste del AULA 12, en el cual no solo se consigue una reducción de la temperatura media del muro durante los meses cálidos mayor que en los demás casos, lo cual resulta altamente beneficioso para la demanda del sistema de refrigeración, sino que se consigue un aumento incluso mayor de la reducción durante los meses de invierno, lo cual puede resultar problemático y debería hacerse un balance que compare las ventajas aportadas por su orientación privilegiada para los meses fríos con el hecho de que la sombra reduzca la temperatura de sus cerramientos exteriores.

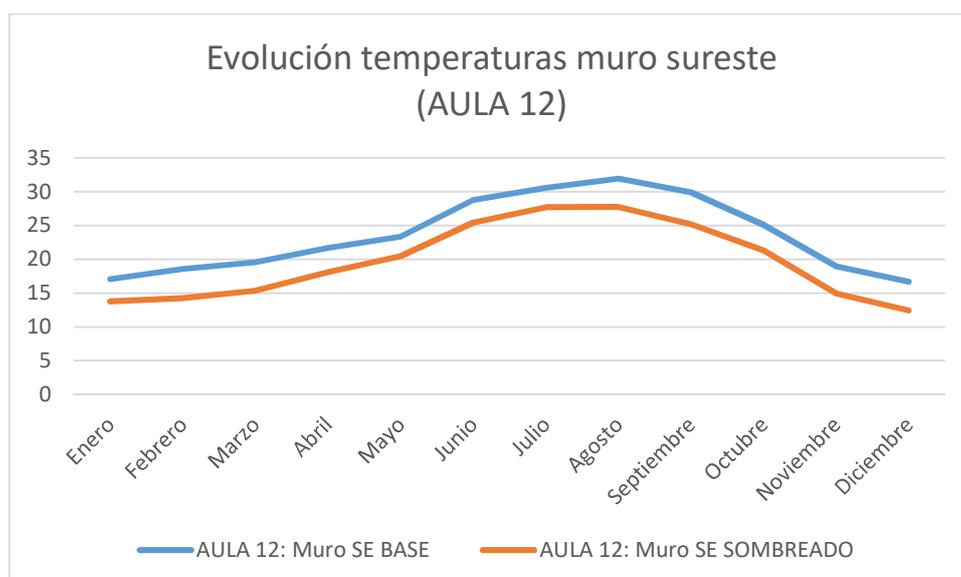


Ilustración 84. Evolución de las temperaturas del muro sureste del AULA 12 para el caso base y con sombras naturales

También se observa que los meses en los que se logra una mayor reducción son los de mayo y junio, seguidos del mes de agosto, meses que son de los más cálidos del año donde se excluye el mes de julio al ser la inclinación de la radiación solar durante ese mes lo suficientemente inclinada para producir sombras suficientes.

Tras haber evaluado el impacto que las sombras naturales tienen sobre las temperaturas de las superficies, se procede a ver el efecto que las mismas tienen sobre la demanda de climatización de las aulas a las que van asociadas.

Tabla 18. Evolución de las demandas de climatización para diferentes aulas del edificio en el caso base y el que cuenta con elementos de sombra naturales

	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
<b>AULA 13</b>	108,82	98,64	52,21	182,68	351,13	376,38	0,00	0,00	346,51	0,24	48,18	160,97
Demanda por área (W/m <sup>2</sup> )	2,42	2,19	1,16	4,06	7,80	8,36	0,00	0,00	7,70	0,01	1,07	3,58
<b>AULA 13: SOMBREADA</b>	121,28	114,84	66,63	140,54	286,86	353,66	0,00	0,00	319,65	0,714	60,64	179,67
Demanda por área (W/m <sup>2</sup> )	2,70	2,55	1,48	3,12	6,37	7,86	0,00	0,00	7,10	0,02	1,35	3,99
% de reducción	-11,45%	-16,42%	-27,62%	23,07%	18,30%	6,04%	-	-	7,75%	-195,04%	-25,86%	-11,62%
<b>AULA 03</b>	73,21	62,15	29,98	157,12	289,74	347,99	0,00	0,00	317,35	0,31	25,27	108,69
Demanda por área (W/m <sup>2</sup> )	1,63	1,38	0,67	3,49	6,44	7,73	0,00	0,00	7,05	0,01	0,56	2,42
<b>AULA 03: SOMBREADA</b>	88,66	83,09	46,11	100,80	211,06	298,73	0,00	0,00	287,10	0,99	38,45	133,402
Demanda por área (W/m <sup>2</sup> )	1,97	1,85	1,02	2,24	4,69	6,64	0,00	0,00	6,38	0,02	0,85	2,96
% de reducción	-21,10%	-33,69%	-53,80%	35,85%	27,16%	14,16%	-	-	9,53%	-218,33%	-52,16%	-22,74%
<b>AULA 11</b>	78,46	55,94	23,77	192,50	362,22	378,91	0,00	0,00	351,72	0,13	27,72	110,36
Demanda por área (W/m <sup>2</sup> )	1,74	1,24	0,53	4,28	8,05	8,42	0,00	0,00	7,82	0,00	0,62	2,45
<b>AULA 11: SOMBREADA</b>	89,48	71,81	32,03	157,21	303,27	360,81	0,00	0,00	330,45	0,199	34,18	125,62
Demanda por área (W/m <sup>2</sup> )	1,99	1,60	0,71	3,49	6,74	8,02	0,00	0,00	7,34	0,00	0,76	2,79
% de reducción	-14,05%	-28,37%	-34,75%	18,33%	16,27%	4,78%	-	-	6,05%	-51,91%	-23,30%	-13,83%
<b>AULA 12</b>	31,97	13,58	6,84	304,52	460,13	437,24	0,00	0,00	430,72	0,12	22,12	46,83
Demanda por área (W/m <sup>2</sup> )	0,61	0,26	0,13	5,80	8,76	8,33	0,00	0,00	8,20	0,00	0,42	0,89
<b>AULA 12 SOMBREADA</b>	38,63	18,67	8,6	263,92	420,27	432,28	0,00	0,00	415,87	0,17	26,28	51,66
Demanda por área (W/m <sup>2</sup> )	0,74	0,36	0,16	5,03	8,01	8,23	0,00	0,00	7,92	0,00	0,50	0,98
% de reducción	-20,83%	-37,48%	-25,73%	13,33%	8,66%	1,13%	-	-	3,45%	-38,21%	-18,81%	-10,31%

A priori se observa, como era de esperar, que durante los meses fríos estos elementos de sombra natural entorpecen con la radiación solar que colabora con el calentamiento de estos espacios; mientras que en los meses más cálidos esta reducción de radiación incidente contribuye con una reducción de la demanda media de refrigeración.

Sin embargo, es necesario comparar las demandas de climatización medias para todo el año, ya que, aunque los porcentajes de incremento de demanda de calefacción son mayores que los de reducción de demanda de refrigeración, su peso sobre el consumo total de energía es menor como se observa en los valores de demanda de climatización por unidad de área, lo que debido a las condiciones climáticas del emplazamiento estudiado puede aportar un resultado general positivo.

Tabla 19. Reducción de la demanda media de climatización

	Promedio base	Promedio con sombra	Porcentaje de ahorro
<b>AULA 13</b>	143,81	137,0406667	4,7%
<b>AULA 03</b>	117,65	107,3660833	8,7%
<b>AULA 11</b>	131,81	125,4215833	4,8%
<b>AULA 12</b>	146,17	139,6958333	4,4%

La tendencia general observada, es que independientemente de la orientación del aula afectada, el porcentaje de reducción de la demanda conjunta de calefacción y refrigeración se mantiene en un valor cercano al 4,5%. La excepción se encuentra en el AULA 03, la cual al encontrarse a una menor altura que las demás se mantiene durante un mayor periodo de tiempo afectada por alguna sombra, además del hecho de que no tiene una cubierta en contacto con el exterior, la cual apenas se ve afectada por el sombreado al mismo tiempo que presenta las temperaturas de superficie más altas registradas.

Al compararse estos valores con los de las temperaturas superficiales se observa que en los meses en los que hay una reducción importante de temperaturas superficiales se tiene una reducción de la demanda de refrigeración, sin embargo, entran en juego otros factores como las temperaturas máximas alcanzadas en los muros. Es el caso del mes de junio, en el que se redujo efectivamente la temperatura del muro pero que no ha conllevado una reducción equivalente de la demanda de refrigeración siendo más apreciable este comportamiento en meses con climas más suaves, mostrando que si la diferencia entre la temperatura del muro exterior y la de consigna del termostato son muy altas el margen de ahorro se reduce. Aun así, la demanda de refrigeración más elevada de estos meses puede hacer que estos ahorros, aunque sean menores en porcentaje que los de meses más suaves, pueden tener un efecto comparable a este si se evalúa su valor absoluto.

Se observa además que el aula más castigada en los meses cálidos es el AULA 12 con orientación sureste, tal y como lo indican sus valores de demanda por metro cuadrado, sin embargo, esto es un arma de doble filo ya que como es lógico conlleva una densidad de demanda inferior en los meses de invierno.

Se excluyen los meses de agosto y octubre para el cálculo de la media del consumo de refrigeración y calefacción respectivamente, ya que no se tiene puesta en marcha la refrigeración durante esos meses el ahorro respecto al total es incluso mayor, lo cual demuestra la importancia que tiene reducir la demanda de refrigeración de los meses más cálidos en el emplazamiento del proyecto

Tabla 20. Reducción de la demanda de climatización media durante los meses de funcionamiento para el caso base y el que cuenta con elementos de sombra naturales

	Promedio base	Promedio con sombra	Porcentaje de ahorro
<b>AULA 13</b>	407,94	383,79	5,9%
<b>AULA 03</b>	337,91	302,37	10,5%
<b>AULA 11</b>	380,59	358,56	5,8%
<b>AULA 12</b>	432,42	411,85	4,8%

### 3.2. EVALUACIÓN DEL IMPACTO DEL MURO VERDE

A lo largo de este apartado, se procede al análisis del efecto que tiene la instalación un muro verde en la fachada suroeste del AULA 13 sobre la demanda de climatización de la misma y la temperatura de la superficie sobre la que se instala.

En los casos aquí propuestos se observará el efecto sobre las variables mencionadas suponiendo que solo se tiene en cuenta el efecto del muro verde, y en el caso en el que este se combina con el sombreado natural. Estos resultados se valorarán para diferentes opciones del muro verde que presenten una vegetación basada en especies perennes, caducas o una mezcla homogénea de ambas.

Tabla 21. Evolución de la temperatura superficial del muro afectado por la Green Wall, para diferentes tipologías y comparación con el caso base y el caso con sombreado natural

	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
<b>Superficie sin sombrear</b>	16,23	17,13	18,51	21,33	23,49	29,30	30,75	32,16	29,54	24,95	18,15	15,71
<b>Perenne</b>	14,13	14,59	15,61	18,36	20,65	25,69	27,91	28,38	25,98	22,09	15,63	13,01
<b>% de reducción</b>	12,9%	14,8%	15,7%	13,9%	12,1%	12,3%	9,2%	11,8%	12,1%	11,4%	13,9%	19,8%
<b>Mezcla</b>	14,83	15,39	16,6	19,2	20,77	25,74	27,89	28,35	25,97	22,19	15,89	13,866
<b>% de reducción</b>	8,6%	10,2%	10,3%	10,0%	11,6%	12,2%	9,3%	11,8%	12,1%	11,0%	12,5%	11,7%
<b>Caduca</b>	15,51	16,16	17,56	18,97	20,47	25,66	27,89	28,35	25,97	22,06	16,01	14,75
<b>% de reducción</b>	4,4%	5,7%	5,1%	11,1%	12,9%	12,4%	9,3%	11,8%	12,1%	11,6%	11,8%	6,1%
<b>AULA 13: Muro Suroeste (Sombreado SIN GW)</b>	15,92	16,48	17,72	20,05	21,89	27,24	29,12	29,91	27,40	22,90	16,52	15,34
<b>% de reducción</b>	1,8%	3,8%	4,2%	6,0%	6,8%	7,0%	5,3%	7,0%	7,2%	8,1%	8,9%	2,3%

De la tabla anterior, se observa como de forma generalizada, el efecto de la Green Wall como elemento para reducir la temperatura de las superficies es más efectivo que el arbolado circundante, al estar esta Solución Basada en la Naturaleza más localizada sobre la superficie que los elementos de sombra naturales.

Además, se observan los beneficios que conlleva el uso de hoja caduca, la cual mantiene las superficies más calientes en los meses más fríos mientras que apenas muestra diferencia con respecto al otro tipo de vegetación en los meses más cálidos.

Se observa, además, de forma análoga al efecto del sombreado que ambas Soluciones Basadas en la Naturaleza consiguen una mayor bajada de temperatura en los meses de mayo, junio, agosto y septiembre; no siendo de tanta importancia en el mes de julio.

Tabla 22. Evolución de la temperatura superficial del muro afectado por la Green Wall y sombreado natural, para diferentes tipologías y comparación con el caso base y el caso con sombreado natural

	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
<b>Superficie sin sombrear</b>	16,23	17,13	18,51	21,33	23,49	29,30	30,75	32,16	29,54	24,95	18,15	15,71
<b>Superficie sombreada</b>	15,92	16,48	17,72	20,05	21,88	27,24	29,12	29,91	27,40	22,90	16,52	15,34
<b>% de reducción</b>	1,8%	3,8%	4,2%	6,0%	6,8%	7,0%	5,3%	7,0%	7,2%	8,1%	8,9%	2,3%
<b>Perenne + sombras</b>	15,91	16,23	17,37	19,45	20,96	25,99	28,11	28,95	26,83	22,66	16,42	15,08
<b>% de reducción con sombras</b>	0,1%	1,5%	2,0%	3,0%	4,2%	4,6%	3,5%	3,2%	2,1%	1,1%	0,6%	1,7%
<b>% de reducción total</b>	1,9%	5,3%	6,2%	8,8%	10,8%	11,3%	8,6%	10,0%	9,2%	9,2%	9,5%	5,3%
<b>Mezcla + sombras</b>	15,47	15,8	17,03	19,53	20,99	26,03	28,11	28,95	26,83	22,67	16,37	14,7
<b>% de reducción con sombras</b>	2,8%	4,1%	3,9%	2,6%	4,1%	4,5%	3,5%	3,2%	2,1%	1,0%	0,9%	4,2%
<b>% de reducción total</b>	4,6%	7,8%	8,0%	8,4%	10,6%	11,2%	8,6%	10,0%	9,2%	9,1%	9,8%	6,4%
<b>Caduca + sombras</b>	15,63	15,97	17,29	19,33	20,78	25,99	28,11	28,95	26,83	22,63	16,27	14,92
<b>% de reducción con sombras</b>	1,8%	3,1%	2,4%	3,6%	5,1%	4,6%	3,5%	3,2%	2,1%	1,2%	1,5%	2,8%
<b>% de reducción total</b>	3,7%	6,8%	6,6%	9,4%	11,5%	11,3%	8,6%	10,0%	9,2%	9,3%	10,4%	5,0%

En este caso, se observa que el efecto de enfriamiento de superficies del muro verde se ve menguado cuando ya se tiene un elemento de sombra afectando de forma directa la superficie sobre la cual se instala la Solución Basada en la Naturaleza.

De hecho, al reducirse la velocidad del viento en el muro, la transmisión de calor por convección del mismo se ve reducida, por lo que en el caso en que el muro ya está lo suficientemente sombreado, esta reducción de la velocidad puede conllevar una subida de la temperatura ya que la sombra de la Green Wall no efectúa un impacto suficiente.

Esto se puede observar en los casos en los que se tiene un muro verde sin sombra natural, ya que estas circunstancias se tienen unas bajadas de temperatura mayores que en el caso en el que se tiene sombreado además del muro verde. Esto se demuestra en el caso que se tienen ambas Soluciones

Basadas en la Naturaleza, ya que, durante los meses fríos, al ya ser el efecto del sombreado el suficiente, se tiene una menor reducción de temperatura durante estos ya que la menor velocidad del viento que se tienen en los muros perennes contribuye a que se pierda menos calor del edificio resultando más efectivos que los de hoja caduca en estos casos.

Tabla 23. Reducción de la temperatura media para meses cálidos y fríos de diferentes tipologías de muro verde combinado o no con sombras con respecto al caso base

	Meses cálidos		Meses fríos	
	Promedio	Reducción respecto al caso base	Promedio	Reducción respecto al caso base
Solo sombra	25,94	6,6%	17,48	5,2%
Solo GW perenne	24,50	11,8%	15,84	14,1%
Solo GW mezcla	24,65	11,2%	16,46	10,8%
Solo GW caduca	24,55	11,6%	17,01	7,8%
GW perenne + Sombra	25,05	9,8%	17,28	6,3%
GW mix + Sombra	25,07	9,7%	17,01	7,8%
GW caduca + Sombra	25,00	10,0%	17,12	7,2%

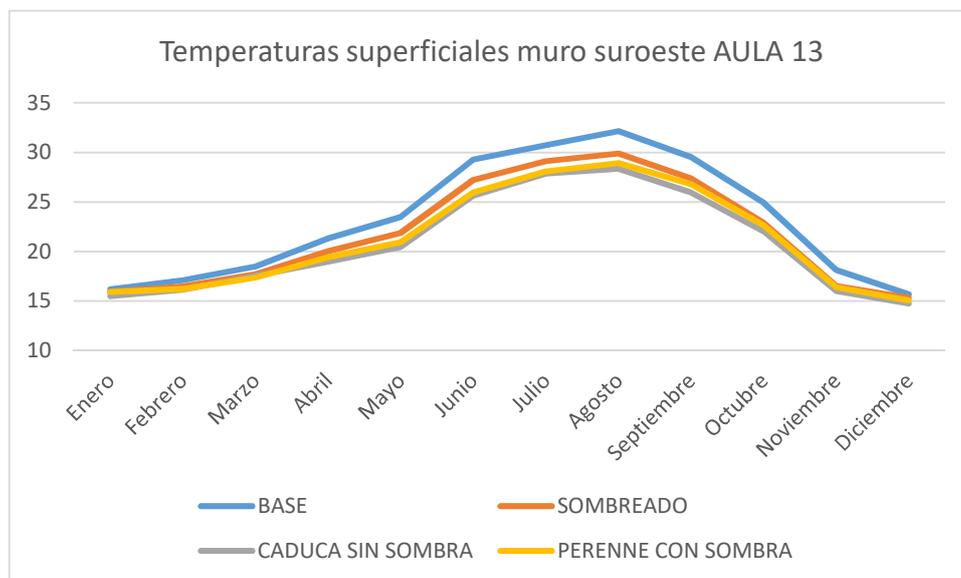
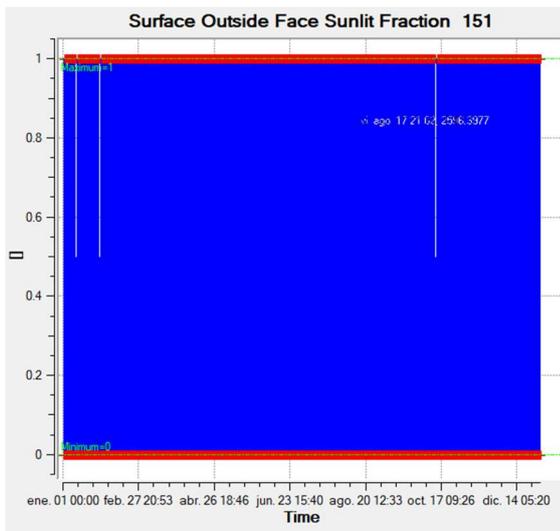


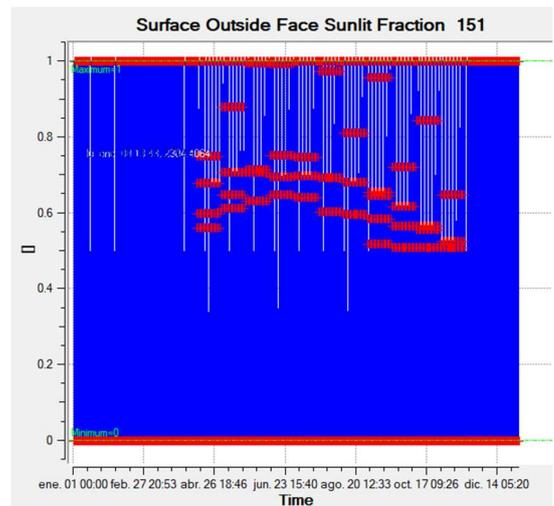
Ilustración 85. Evolución de las temperaturas superficiales a lo largo del año para una combinación de diferentes NBS

En el gráfico anterior se ve claramente como el efecto del sombreado es más efectivo en los meses de temperaturas más elevadas, apreciándose de forma clara el efecto del sombreado y de la Green Wall por separado, así como la pequeña diferencia presente entre cuando se usa una NBS y cuando se usan ambas.

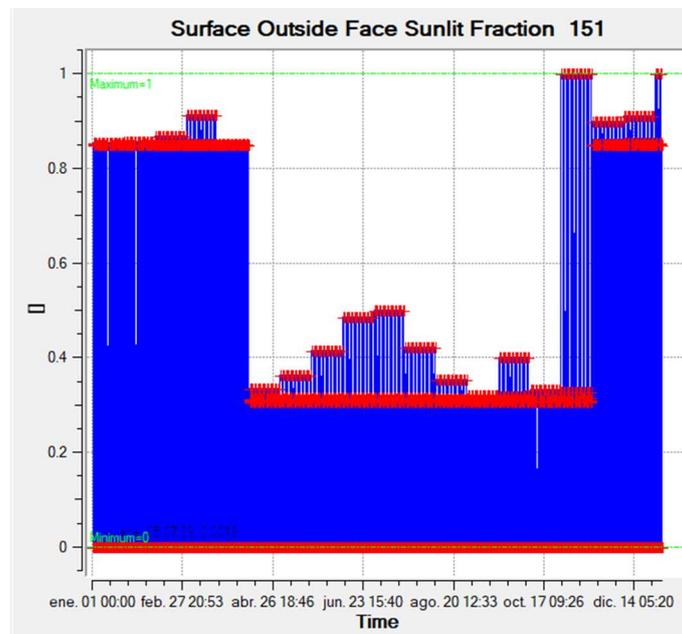
Si se contrastan estos datos con los de porcentaje de la superficie que se halla sombreada se observan correlaciones con los datos previamente mostrados.



*Base*



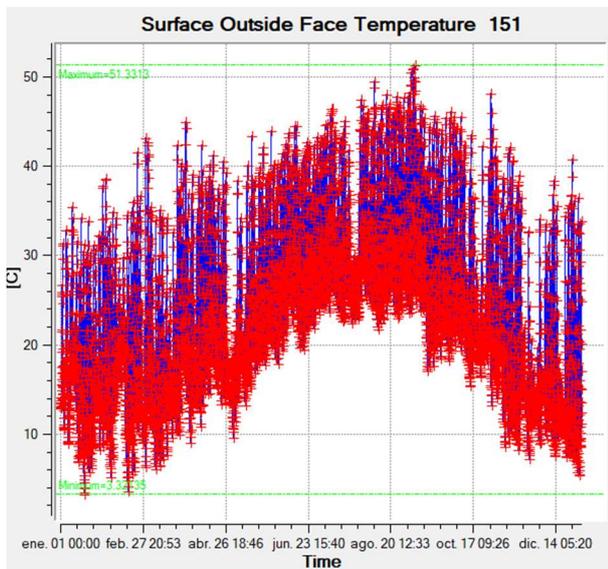
*Sombras*



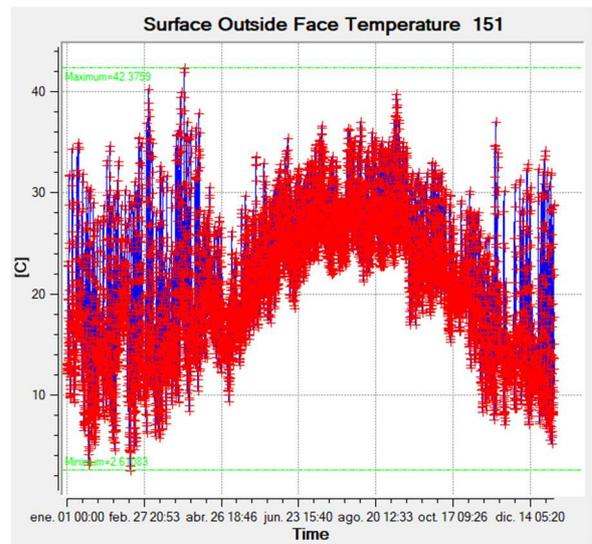
*Caduca sin sombra*

*Ilustración 86. Comparación de la fracción soleada del muro afectado por la Green Wall empleando diferentes NBS*

Como se observa, en los gráficos superiores, se muestra la efectividad de la Green Wall como elemento de sombra, ya que en el caso de un muro verde caduco sin contar sombras adicionales sigue un patrón de sombreado coherente con la plantilla de transmitancia típica de las hojas caducas superando los porcentajes de sombreado del caso con sombreado natural.



Caso base



Con Green Wall caduca y sin sombra

Ilustración 87. Comparación de la temperatura del muro afectado por la Green Wall empleando entre el caso base y el que emplea únicamente una Green Wall caduca

Observando la evolución de las temperaturas de la superficie estudiada a lo largo del año se observa que se han suavizado de forma considerable las temperaturas, consiguiendo una reducción de la temperatura superficial que es especialmente visible durante los meses más cálidos del año. Así pues, se puede ver como la temperatura de superficie máxima anual pasa de ser 51,33°C en el mes de septiembre, a tener un valor de 42,37°C en el mes de mayo, un valor casi 10 grados menor. Las consecuencias de estos valores más bajos son muy beneficiosas, especialmente para ayudar a mejorar las condiciones de confort urbanos de las zonas peatonales cercanas reduciendo la cantidad de calor reflejado por esta superficie. Esta reducción, una vez más, es más efectiva en los meses donde el efecto del sombreado es mayor.

Tras haber estudiado el efecto que las diferentes configuraciones de Green Wall tienen sobre la temperatura superficial del muro sobre el que se instala, se procede a observar el resultado equivalente que estas reducciones de temperaturas de superficie tienen sobre las demandas de calefacción y refrigeración el aula sobre la cual se va a instalar el muro verde en la cara suroeste de su envolvente.

Tabla 24. Evolución de la demanda de climatización del aula afectada por la Green Wall, para diferentes tipologías. Comparación con el caso base y el caso con sombreado natural

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
<b>Superficie sin sombreadar</b>	108,82	98,64	52,21	182,68	351,13	376,38	0,00	0,00	346,51	0,24	48,18	160,97
<b>Perenne</b>	125,69	113,72	63,56	155,26	324,56	371,026	0	0	337,14	0,4	53,88	185,96
<b>% de reducción</b>	-15,5%	-15,3%	-21,7%	15,0%	7,6%	1,4%	-	-	2,7%	-65,3%	-11,8%	-15,5%
<b>Mezcla</b>	120,53	109,91	60,26	159,56	321,94	370,13	0	0	336,79	0,4	53,14	178,2
<b>% de reducción</b>	-10,8%	-11,4%	-15,4%	12,7%	8,3%	1,7%	-	-	2,8%	-65,3%	-10,3%	-10,7%
<b>Caduca</b>	116,03	106,33	57,08	156,95	319,3	369,91	0	0	336,79	0,41	52,26	170,65
<b>% de reducción</b>	-6,6%	-7,8%	-9,3%	14,1%	9,1%	1,7%	-	-	2,8%	-69,4%	-8,5%	-6,0%
<b>Superficie sombreada</b>	121,28	114,84	66,63	140,54	286,86	353,66	0,00	0,00	319,65	0,714	60,64	179,67
<b>% de reducción</b>	-11,5%	-16,4%	-27,6%	23,1%	18,3%	6,0%	#¡DIV/0!	#¡DIV/0!	7,8%	-195,0%	-25,9%	-11,6%

Tabla 25. Comparación entre la reducción de temperatura superficial y demanda de climatización mensual para el aula afectada por el muro verde para diferentes tipologías del mismo

	Perenne		Mezcla		Caduca		Sombra	
	% de reducción demanda	% de reducción temperatura	% de reducción demanda	% de reducción temperatura	% de reducción demanda	% de reducción temperatura	% de reducción demanda	% de reducción temperatura
<b>Ene</b>	-15,51%	12,92%	-10,76%	8,60%	-6,63%	4,41%	-11,45%	1,86%
<b>Feb</b>	-15,29%	14,84%	-11,43%	10,17%	-7,80%	5,68%	-16,42%	3,80%
<b>Mar</b>	-21,74%	15,67%	-15,42%	10,32%	-9,33%	5,13%	-27,62%	4,25%
<b>Abr</b>	15,01%	13,92%	12,66%	9,99%	14,08%	11,06%	23,07%	6,00%
<b>May</b>	7,57%	12,09%	8,31%	11,58%	9,07%	12,86%	18,30%	6,82%
<b>Jun</b>	1,42%	12,32%	1,66%	12,15%	1,72%	12,42%	6,04%	7,01%
<b>Jul</b>	-	9,24%	-	9,30%	-	9,30%	-	5,30%
<b>Ago</b>	-	11,75%	-	11,85%	-	11,85%	-	7,00%
<b>Sep</b>	2,70%	12,05%	2,81%	12,09%	2,81%	12,09%	7,75%	7,23%
<b>Oct</b>	-65,29%	11,45%	-65,29%	11,04%	-69,42%	11,57%	-195,04%	8,16%
<b>Nov</b>	-11,83%	13,88%	-10,29%	12,45%	-8,47%	11,79%	-25,86%	8,97%
<b>Dic</b>	-15,52%	19,82%	-10,70%	11,74%	-6,01%	6,11%	-11,62%	2,33%

Estudiando el efecto del muro verde como única Solución Basada en la Naturaleza para los diferentes tipos de vegetación sobre la reducción de la temperatura superficial y la demanda de climatización, se observa que se produce una reducción de la temperatura de la superficie más que notable, lo cual se evidencia al compararlo con los efectos del sombreado como medida aislada, demostrando que el hecho de presentar una sombra más dirigida consigue unas reducciones de temperatura superficial más efectivas que el sombreado general de las inmediaciones.

No obstante, se observa una vez más el efecto de la reducción de velocidad del viento que produce la Green Wall, la cual afecta negativamente al intercambio de calor por convección con el ambiente, por lo que, aunque las reducciones de temperaturas superficiales son superiores a las del caso con solo sombreado, la reducción de la demanda de climatización no es tiene un impacto tan elevado ya que se tienen otros efectos en cuenta diferentes al bloqueo de radiación incidente. Una vez más se observa que los tres tipos de vegetación actúan de forma similar durante los meses más cálidos, aunque el caso de la hoja caduca no perjudica tanto las demandas de calefacción como el resto de opciones.

Si se analiza el efecto conjunto de las dos Soluciones Basadas en la Naturaleza conjuntas:

Tabla 26. Evolución de la demanda de climatización del aula afectada por la Green Wall y sombreado natural, para diferentes tipologías. Comparación con el caso base y el caso con sombreado natural

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
<b>Superficie sin sombrear</b>	108,82	98,64	52,21	182,68	351,13	376,38	-	-	346,51	0,24	48,18	160,97
<b>Superficie sombreada</b>	121,28	114,84	66,63	140,54	286,86	353,66	-	-	319,65	0,714	60,64	179,67
<b>% de reducción</b>	-11,5%	-16,4%	-27,6%	23,1%	18,3%	6,0%	-	-	7,8%	-195,0%	-25,9%	-11,6%
<b>Perenne + sombras</b>	124,045	118,53	69,25	131,171	273,84	350,33	-	-	317,42	0,73	61,41	182,91
<b>% de reducción con sombras</b>	-2,3%	-3,2%	-3,9%	6,7%	4,5%	0,9%	-	-	0,7%	-2,2%	-1,3%	-1,8%
<b>% de reducción total</b>	-14,0%	-20,2%	-32,6%	28,2%	22,0%	6,9%	-	-	8,4%	-201,7%	-27,5%	-13,6%
<b>Mezcla + sombras</b>	127,41	121,06	71,1	132,32	274,26	350,44	-	-	317,42	0,73	61,82	186,56
<b>% de reducción con sombras</b>	-5,1%	-5,4%	-6,7%	5,8%	4,4%	0,9%	-	-	0,7%	-2,2%	-1,9%	-3,8%
<b>% de reducción total</b>	-17,1%	-22,7%	-36,2%	27,6%	21,9%	6,9%	-	-	8,4%	-201,7%	-28,3%	-15,9%
<b>Caduca + sombras</b>	126,37	120,32	70,35	130,68	272,32	350,92	-	-	317,42	0,73	62,15	184,63
<b>% de reducción con sombras</b>	-4,2%	-4,8%	-5,6%	7,0%	5,1%	0,8%	-	-	0,7%	-2,2%	-2,5%	-2,8%
<b>% de reducción total</b>	-16,1%	-22,0%	-34,7%	28,5%	22,4%	6,8%	-	-	8,4%	-201,7%	-29,0%	-14,7%

Se observa a simple vista que la combinación de ambas medidas tiene una reducción de la demanda de refrigeración generalizada a lo largo de todo el año, siendo de especial importancia en los meses de abril y mayo, se tiene una reducción de la demanda media de refrigeración de cerca de un 25%, siendo la Green Wall responsable de casi un 6% de la reducción de demanda durante esos meses. Sin embargo, se observa que se tiene un efecto inverso durante ciertos meses más fríos del año aumentando los consumos de calefacción, especialmente durante los meses enero, febrero y marzo **siendo la opción menos restrictiva la que emplea hoja puramente perenne**, la cual como se ha explicado con anterioridad reduce la velocidad del viento, afectando de forma negativa a las pérdidas de calor por convección por lo que asegura que se mantenga una temperatura superior en la superficie durante los meses más fríos sin mostrar diferencias sustanciales en los meses de verano con los otros tipos de vegetaciones para el muro.

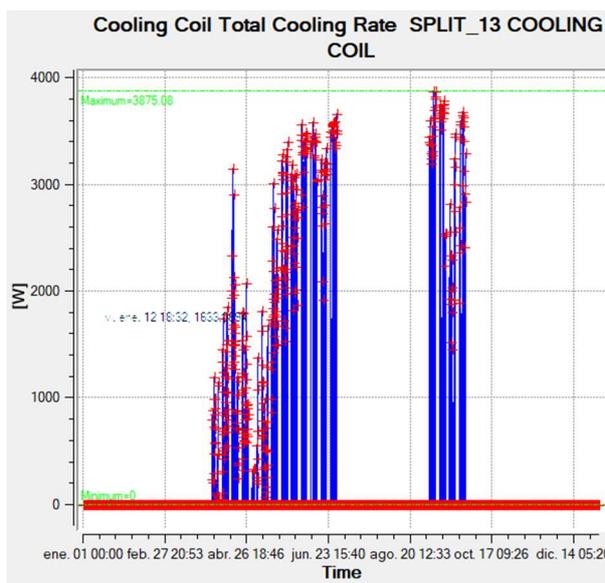
En la siguiente tabla se comparan las demandas medias durante los periodos en los que el sistema de climatización está funcionando y se observa el porcentaje de reducción que se tiene respecto al base para las opciones en las que se tiene solo la Green Wall y en los casos en los que el muro verde se combina con las sombras.

Tabla 27. Reducción de la demanda de climatización para diferentes tipologías de muros verdes combinados o no con sombras, y comparados con el caso base y el caso con sombreado natural ya existente

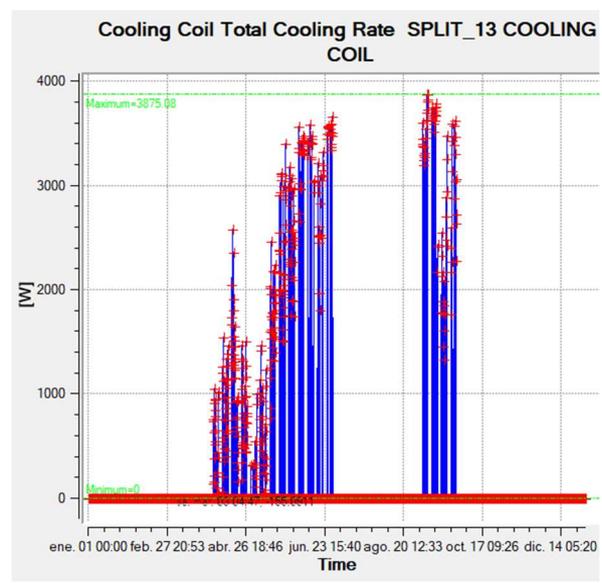
	Promedio calef sin sombra	Promedio calef con sombra	Promedio ref sin sombra	Promedio ref con sombra	Total sin sombra	Total con sombra	Ahorro sin sombra	Ahorro con sombra
Sin GW	93,76	108,612	314,18	275,18	407,94	383,79	0%	5,9%
GW perenne	108,56	111,229	297,00	268,19	405,56	379,42	0,6%	7,0%
GW mezcla	104,408	113,59	297,105	268,61	401,51	382,20	1,6%	6,3%
GW caduca	100,47	112,764	295,7375	267,835	396,21	380,60	2,9%	6,7%

Mediante los datos de la tabla se deduce que la capacidad para reducir la demanda de climatización para los muros verdes no es tan grande como en el caso de las sombras, a pesar de su excelente capacidad para reducir las temperaturas superficiales sobre las que actúan.

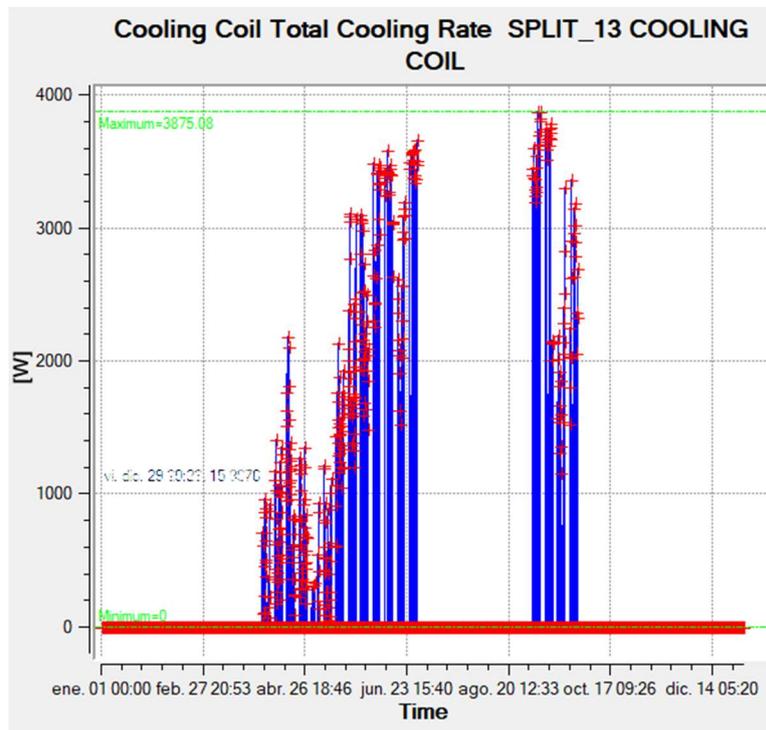
De forma similar al estudio de las temperaturas se observa que si solo se tiene en cuenta el muro verde optar por una opción puramente caduca es lo más beneficioso. Sin embargo, si se opta por evaluar su acción conjunta con las sombras naturales circundantes, el caso más beneficioso es el de un muro perenne por las razones derivadas con la transmisión de calor por convección que ya se ha explicado con anterioridad. No obstante, estos resultados están sujetos al tipo de año meteorológico estudiado, ya que un año más frío o cálida podría arrojar resultados diferentes.



Caso base



Caso con GW caduca y sin sombra



Caso con GW perenne y sombra

Ilustración 88. Comparación de la demanda anual de refrigeración para diferentes NBS

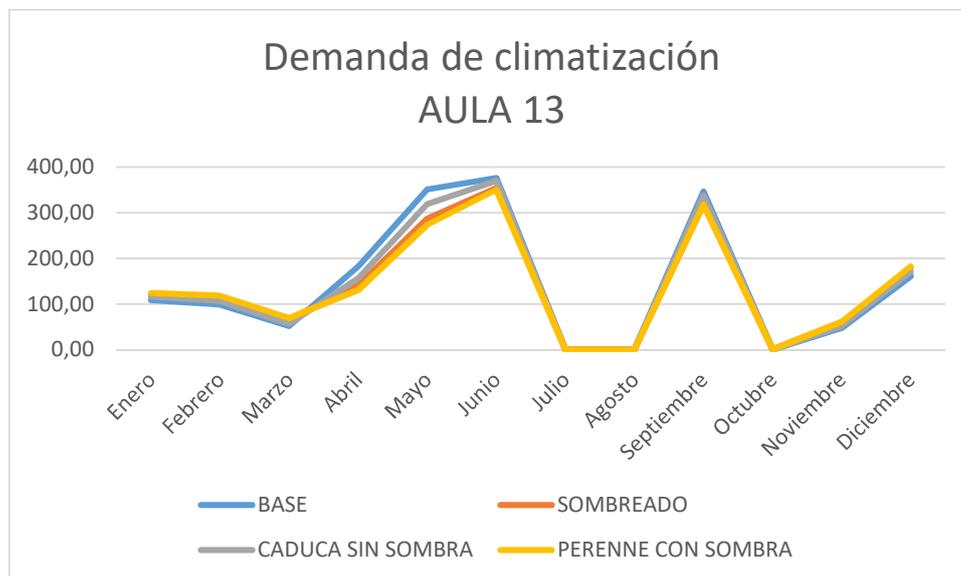
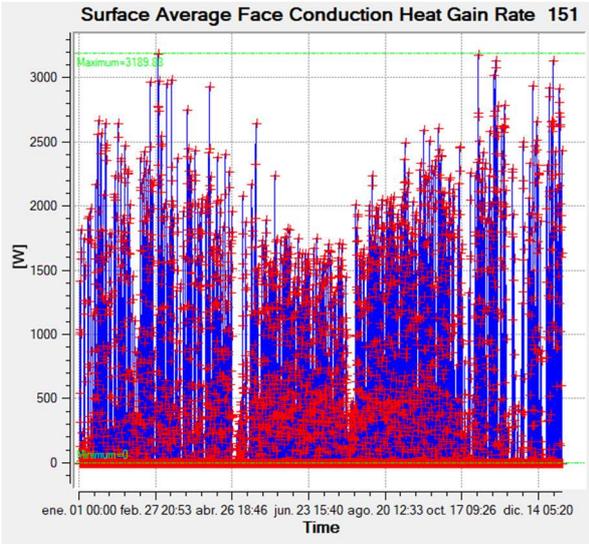


Ilustración 89. Evolución de la demanda de climatización anual para diferentes combinaciones de NBS

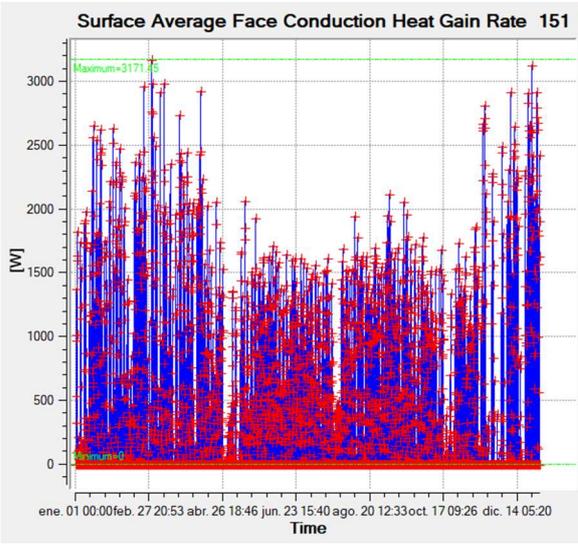
Como se observa de los gráficos presentados, el efecto de estas medidas es más importante durante los meses cálidos de primavera y otoño, en los que el sol no está tan inclinado y las sombras pueden actuar de forma más efectiva sobre la fracción del edificio simulada, además que, en los casos del sombreado con hoja perenne, son los periodos del año cuando se muestra su verdadero potencial.

Aunque el porcentaje de reducción de la demanda de climatización pueda parecer bajo, hay que tener en cuenta que el muro sobre el cual se ha actuado se encuentra en una orientación castigada por la radiación solar, este solo representa una pequeña parte de los cerramientos que componen el aula estudiada, por lo que se van a estudiar las ganancias térmicas por conducción para los cerramientos que componen el aula.

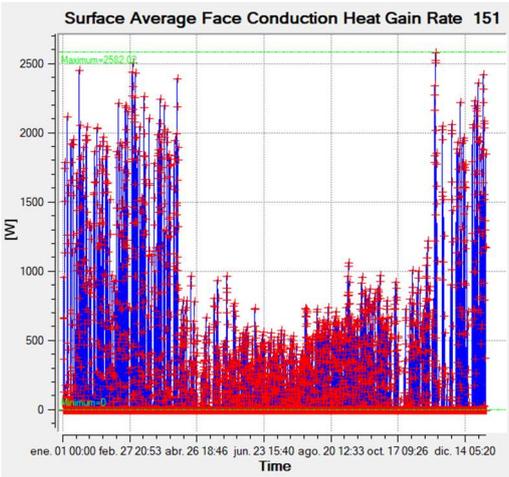
A continuación, se muestran las ganancias a través del muro para el caso de un muro verde de hoja caduca sin sombreado adicional comparándose ambas con el caso base y el caso que cuenta solo con sombreado natural como Solución Basada en la Naturaleza.



Base



Sombras



Caduca sin sombra

Ilustración 90. Comparación de las ganancias por conducción a través de la superficie afectada por el muro verde para diferentes combinaciones de NBS

Se muestra que el efecto de sombreado del muro verde resulta altamente efectivo para reducir las ganancias a través del muro, siendo más efectivas que el sombreado natural y actuando especialmente en los periodos del año en los cuales se ha demostrado que se tiene un mayor porcentaje de área superficial sombreada.

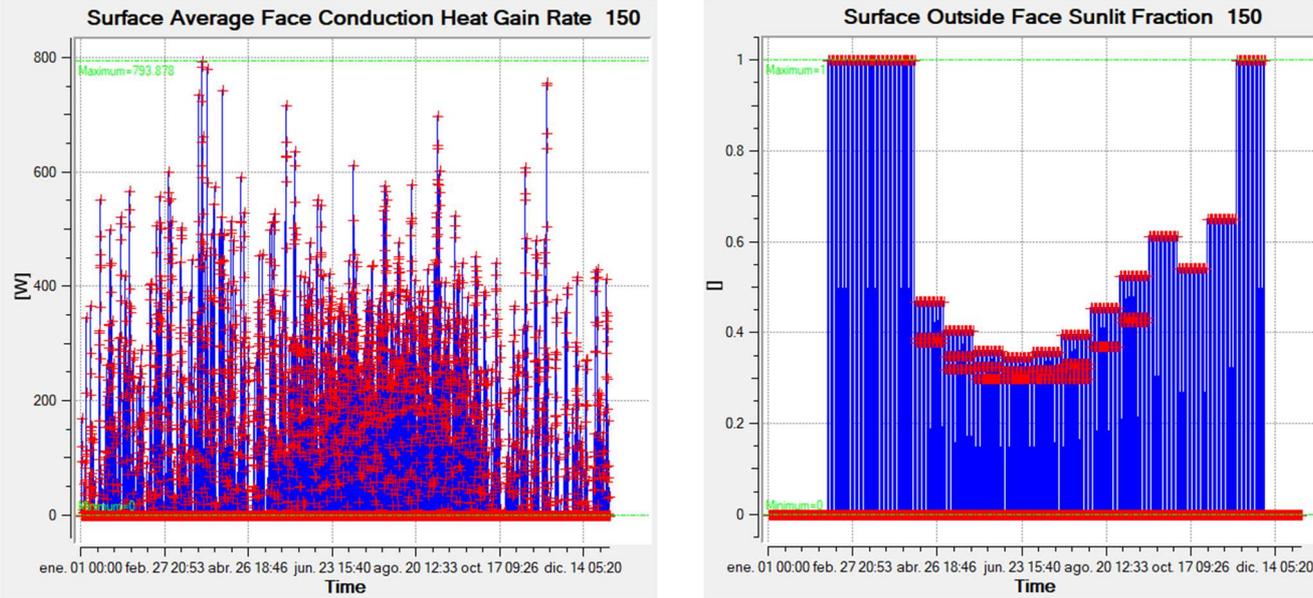


Ilustración 91. Ganancias térmicas por conducción y porcentaje anual de fracción soleada para el muro noroeste del AULA 13

Si se analizan las ganancias por conducción en el otro muro del aula se observa que el valor medio en esta superficie es mucho menor, debido a la orientación noroeste que este presenta, mucho menos castigada por el sol, además de contar mejor sombreada como se ve en la gráfica adjunta de porcentaje de superficie iluminada.

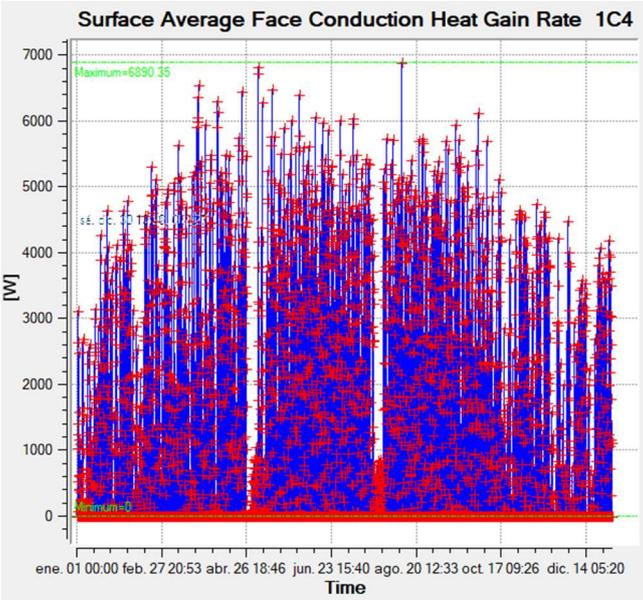


Ilustración 92. Ganancias térmicas por conducción para la cubierta del AULA 13

Sin embargo, es cuando se analizan ganancias a través de la cubierta donde se observa cual es mayor punto de ganancias térmicas del aula, alcanzando valores máximos de más del doble que el muro durante los meses fríos, siendo especialmente notable su efecto en los meses más cálidos, en los cuales mientras que la Green Wall está consiguiendo reducir de forma más efectiva las ganancias a través del muro, por la cubierta se están teniendo ganancias de un orden hasta catorce veces superior.

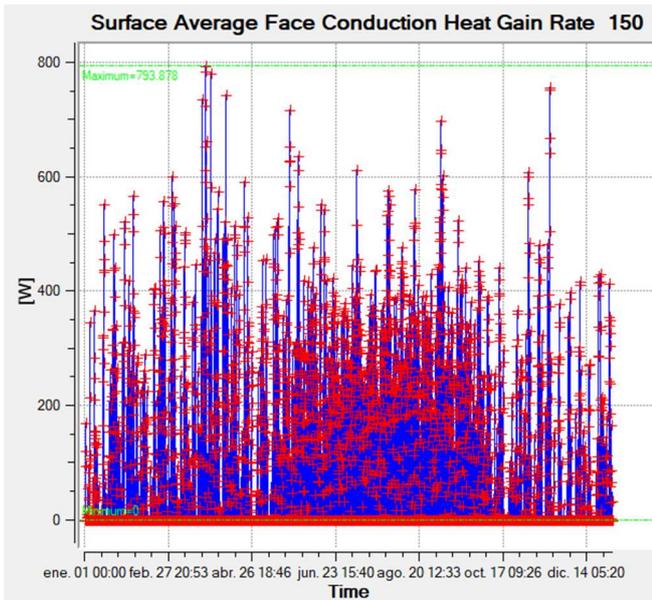
Con las ventajas enumeradas y demostradas de los muros verdes a lo largo de este apartado, es importante resaltar que aunque el efecto que estos tienen sobre la demanda de climatización total del aula no es muy elevado, y más aún si se tiene en cuenta además el sombreado natural, se ha mostrado la excelente labor que estos desempeñan para reducir la temperatura superficial de los cerramientos sobre los que actúan, así como la excelente reducción de las ganancias por conducción que estos aportan.

Adicionalmente, es importante resaltar las ventajas transversales al ámbito de la eficiencia energética en los edificios que estas Soluciones Basadas en la Naturaleza tienen, como la mejora del confort de las áreas peatonales adyacentes gracias a la reducción de temperatura de las superficies afectadas, la depuración del agua con la cual han sido diseñados en mente, la mejora de la biodiversidad urbana y la mejora de la calidad del aire entre otras muchas mejoras indirectas.

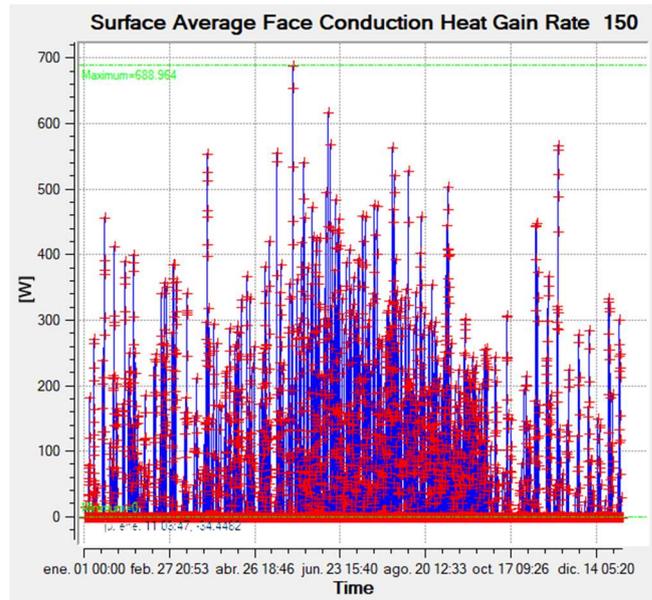
# CAPITULO 4. ACTUACIONES ADICIONALES

## 4.1. ESTUDIO DE GREEN WALL EN TODOS LOS MUROS DEL AULA 13

Una de las opciones barajadas es ver si realmente tiene el suficiente impacto recubrir por completo la envolvente del AULA 13. Para ello se ha introducido una segunda Green Wall en el muro noroeste del AULA 13 modificando la transmitancia del follaje de la Green Wall de forma acorde a la superficie de la pared ocupada por ventanas, pudiendo simular en parte el efecto que se tendría al no recubrir la superficie por completo dejando las ventanas a la vista. Esto además se debe a la dificultad adicional de construir un muro verde cuando hay ventanas de por medio.



Caso base



GW hoja perenne en ambos muros

Ilustración 93. Reducción de las ganancias térmicas por conducción para el muro noroeste del AULA 13

Observando el efecto que tiene la inclusión del segundo muro en la ganancia de calor a través del cerramiento afectado con respecto al caso base se observa que la bajada no es muy elevada, sobre todo si se compara con el gran salto que se tenía en el caso de instalarlo en la fachada suroeste. A eso se le debe de sumar el mayor tamaño de esta Green Wall en comparación con la anterior.

Si se analiza el efecto que esta tiene sobre la demanda de climatización se tienen los siguientes datos.

Tabla 28. Efecto de la instalación de un muro verde en el muro noroeste del AULA 13 sobre la demanda de climatización de la misma

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
<b>AULA 13 (Base)</b>	108,82	98,64	52,21	182,68	351,13	376,38	0,00	0,00	346,51	0,24	48,18	160,97
<b>AULA 13 GW en el Suroeste</b>	125,69	113,72	63,56	155,26	324,56	371,026	0	0	337,14	0,4	53,88	185,96
<b>% de reducción respecto a base</b>	-15,5%	-15,3%	-21,7%	15,0%	7,6%	1,4%	-	-	2,7%	-65,3%	-11,8%	-15,5%
<b>AULA 13 GW en ambos muros</b>	137,6	131,21	80,99	126,95	281,2	355,047	0	0	322,27	0,55	59,32	198,77
<b>% de reducción respecto a base</b>	-26,5%	-33,0%	-55,1%	30,5%	19,9%	5,7%	-	-	7,0%	-127,3%	-23,1%	-23,5%
<b>% de reducción respecto a caso con una GW</b>	-9,5%	-15,4%	-27,4%	18,2%	13,4%	4,3%	-	-	4,4%	-37,5%	-10,1%	-6,9%
<b>AULA 13 (sombreada)</b>	121,28	114,84	66,63	140,54	286,86	353,66	0,00	0,00	319,65	0,714	60,64	179,67
<b>AULA 13 GW en el Suroeste y sombreada</b>	124,045	118,53	69,25	131,171	273,84	350,33	0	0	317,42	0,73	61,41	182,91
<b>% de reducción con respecto a sombreado</b>	-2,3%	-3,2%	-3,9%	6,7%	4,5%	0,9%	-	-	0,7%	-2,2%	-1,3%	-1,8%
<b>AULA 13 GW en ambos muros y sombras</b>	126,23	120,37	71,01	127,11	269,67	349,32	0	0	316,48	0,7	59,74	174,69
<b>% de reducción respecto a base</b>	-16,0%	-22,0%	-36,0%	30,4%	23,2%	7,2%	-	-	8,7%	-189,3%	-	-8,5%
<b>% de reducción con respecto a sombreado</b>	-4,1%	-4,8%	-6,6%	9,6%	6,0%	1,2%	-	-	1,0%	2,0%	-	2,8%
<b>% de reducción con respecto a sombreado con una GW</b>	-1,8%	-1,6%	-2,5%	3,1%	1,5%	0,3%	-	-	0,3%	4,1%	-	4,5%

Se observa que esta medida resulta especialmente efectiva si no se tuvieran en cuenta los efectos del sombreado circundante, consiguiendo unas reducciones de demanda media especialmente grande en los meses de abril y mayo. Sin embargo, si se tienen en cuenta el efecto de ambas Soluciones Basadas en la naturaleza, el efecto no es tan elevado, llegando a ser menor en algunos casos que si no se tuviera sombra.

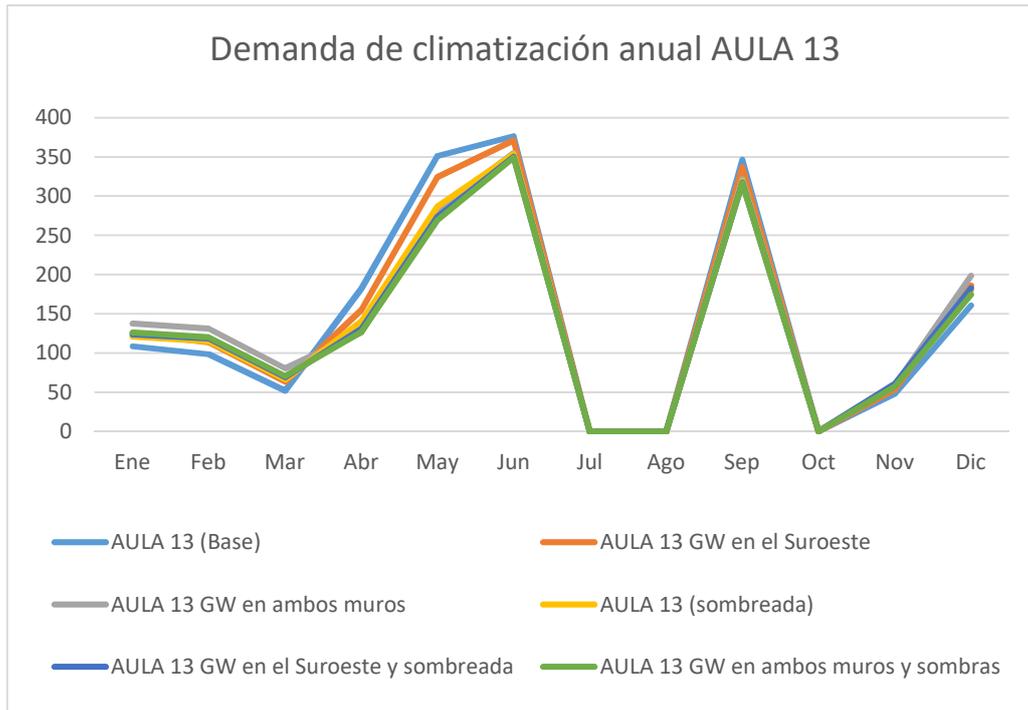


Ilustración 94. Evolución anual de la demanda de climatización anual para el AULA 13 para una serie de combinaciones de NBS

Los datos aportados muestran que el porcentaje de ahorro adicional por añadir una segunda Green Wall no es tan elevado, teniendo en cuenta la mayor superficie que este segundo muro verde presenta, así como la mayor dificultad de su instalación debido a la presencia de ventanas y el posible sobredimensionamiento del sistema de filtración de aguas con el cual se diseñó en mente el primer modelo.

#### 4.2. ESTUDIO DE GREEN WALL EN EL MURO NOROESTE DEL AULA 11

Como se ha observado en el anterior apartado, esta orientación del edificio no presenta un carácter que permita conseguir un ahorro suficiente para justificar la dificultad y dimensiones de la instalación de una nueva Green Wall.

Este valor se puede deducir de forma visual al observar los valores de ganancias por conducción a través del único muro exterior del aula, valor el cual para su tamaño no es tan elevado como para considerarse un punto tan crítico de la envolvente como puede ser el ejemplo de la cubierta. Esto especialmente importante para un aula que tiene un ratio de demanda de climatización por área durante los meses más cálidos superior incluso al del AULA 13, objeto principal del estudio de implantación de la Green Wall

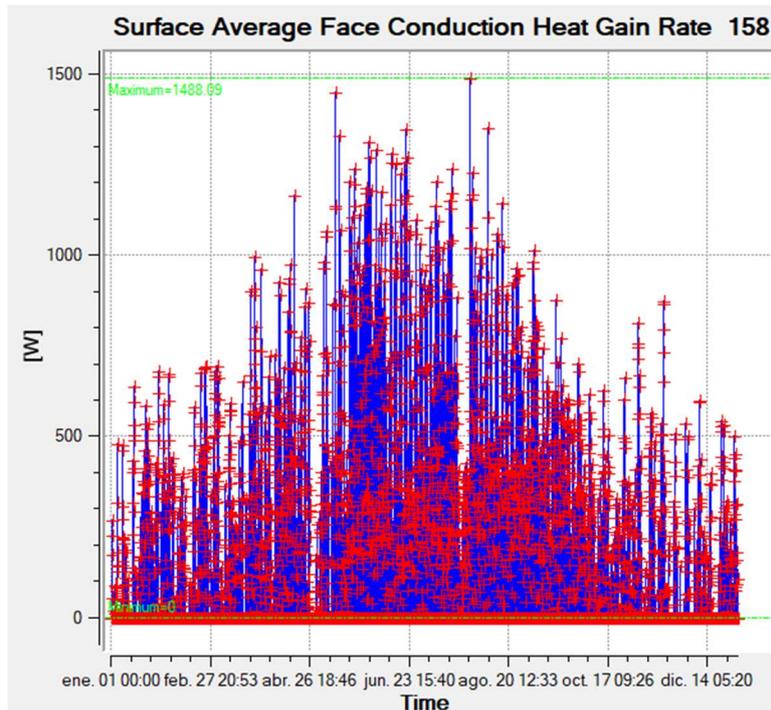
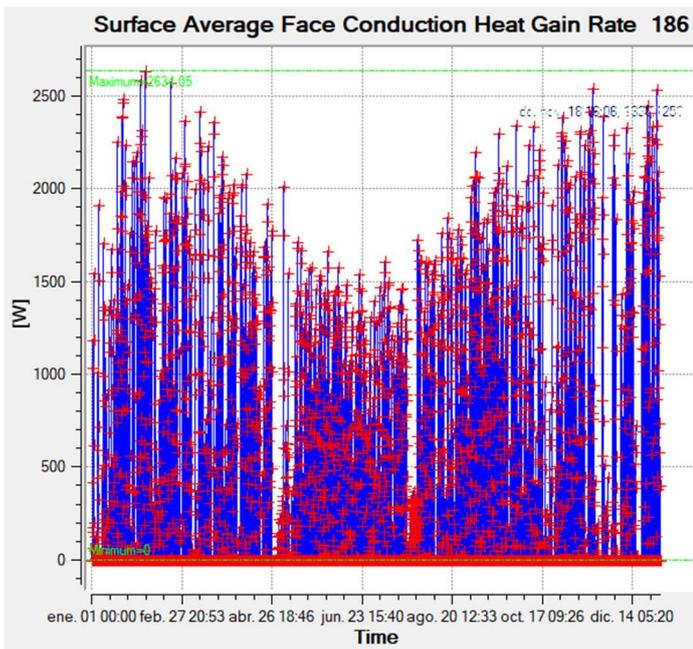


Ilustración 95. Ganancias térmicas por conducción a través del muro noroeste del AULA 11

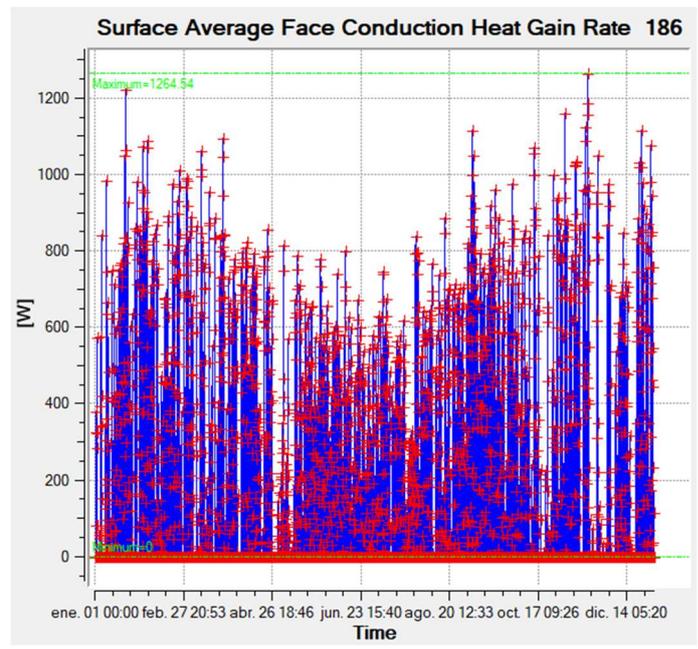
#### 4.3. ESTUDIO DE GREEN WALL EN EL MURO SURESTE DEL AULA 12

Como se observó a lo largo del apartado del análisis de los efectos de los elementos de sombra naturales, el AULA 12 es una de las más castigadas debido a su orientación. Para ello se ha simulado el efecto de un Green Wall en el muro sureste del aula 12 modificando la transmitancia del follaje de la Green Wall de forma acorde a la superficie de la pared ocupada por ventanas, pudiendo simular en parte el efecto que se tendría al no recubrir la superficie por completo dejando las ventanas a la vista.

Como se ve en la siguiente comparativa, en este caso se tiene un aula del mismo tamaño que el AULA 13 estudiada en mayor profundidad a lo largo del proyecto cuya ganancia por conducción a través de los muros se ve reducida prácticamente a la mitad a lo largo de todo el año gracias a la inclusión un muro verde como Solución Basada en la Naturaleza.



Caso base



Con GW perenne

Ilustración 96. Comparación de las ganancias térmicas por conducción a través del muro sureste del AULA 12 para el caso base y con GW perenne

Tabla 29. Evolución de las demandas de climatización y el porcentaje de ahorro medio mensual para diferentes NBS situadas en el muro sureste del AULA 12

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
<b>Superficie sin sombrear</b>	31,97	13,58	6,84	304,59	460,12	437,23	0,00	0,00	430,72	0,12	22,12	46,83
<b>Perenne</b>	66,7	42,01	17,35	226,5	390,6	429,013	0	0	413,04	0,14	28,96	84,74
<b>% de reducción</b>	-108,6%	-209,4%	-153,7%	25,6%	15,1%	1,9%	-	-	4,1%	-16,7%	-30,9%	-81,0%
<b>Superficie sombreada</b>	38,63	18,67	8,6	263,92	420,27	432,28	0,00	0,00	415,87	0,17	26,28	51,66
<b>Perenne (Sombreado)</b>	40,2	20,14	8,99	232,22	377,61	424,93	0	0	409,83	0,18	27,08	52,12
<b>% de reducción con sombras</b>	-4,1%	-7,9%	-4,5%	12,0%	10,2%	1,7%	-	-	1,5%	-5,9%	-3,0%	-0,9%
<b>% de reducción</b>	-25,7%	-48,3%	-31,4%	23,8%	17,9%	2,8%	-	-	4,9%	-50,0%	-22,4%	-11,3%

En este caso se observa como en los meses más cálidos el efecto únicamente de la Green Wall aporta unas reducciones de las demandas de climatización más que importantes. Esto viene a cambio de un incremento bastante importante de las demandas de calefacción, no obstante, en esta orientación del edificio estos valores ya eran muy bajos de por sí.

En este caso, a diferencia del caso del AULA 13, el efecto combinado de ambas Soluciones Basadas en la Naturaleza sí que se hace patente observándose unas reducciones de las demandas medias de refrigeración a lo largo de los meses de abril y mayo de alrededor del 11% que si solo se tuviera sombreado natural y nada más.

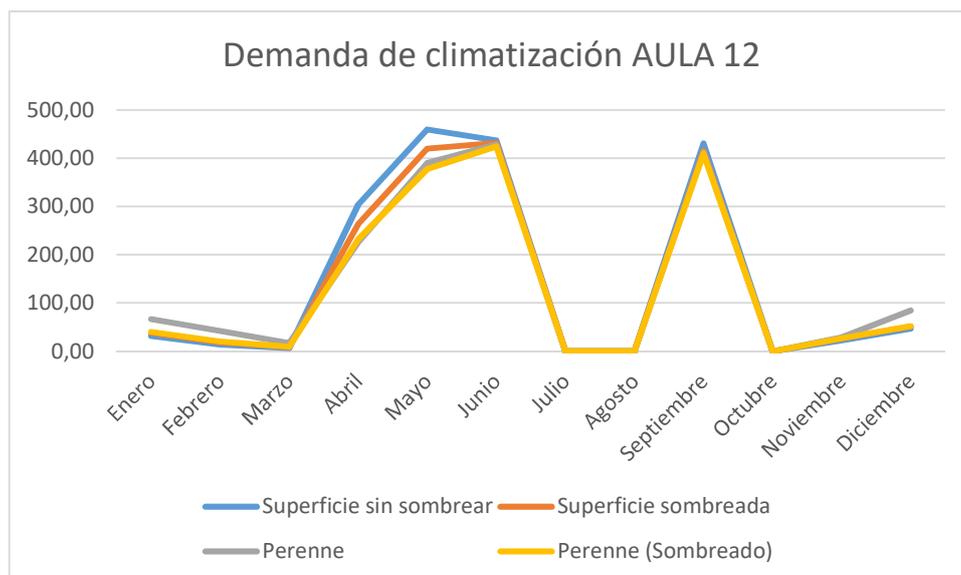


Ilustración 97. Evolución anual de la demanda de climatización anual para el AULA 13 para una serie de combinaciones de NBS

Es por ello por lo que esta medida resultaría altamente interesante desde el punto de vista energético, más incluso que el aula en la cual está previsto instalar el muro verde como parte del proyecto GrowGreen. No obstante, sería necesario barajar la dificultad y mayores dimensiones de esta actuación con respecto a la planificada para llevar a cabo un estudio de viabilidad más detallado.

#### 4.4. INSTALACIÓN DE UNA CUBIERTA VERDE

Como se ha observado a lo largo del análisis de la implantación del muro verde en el AULA 13 recogido en el apartado de análisis, la evolución de las ganancias por conducción del muro afectado ha sufrido una reducción sustancial con respecto al caso en el cual no se ve afectado por otras Soluciones Basadas en la Naturaleza. No obstante, esta mejora tiene un peso muy pequeño con respecto a las ganancias por conducción totales de todos sus cerramientos, siendo de mayor importancia el calor que se cede al interior a partir de la cubierta del edificio, la cual además de verse afectada por una elevada temperatura y no presentar ningún elemento de sombra que la afecte directamente, tiene unos valores de ganancias por conducción a través de la misma que llega a ser hasta 14 veces superior que la que atraviesa el muro suroeste afectado durante los meses más castigados por el calor del año.

Para ello se propone la implantación de una cubierta verde, la cual ayuda a reducir la temperatura, y por ende las ganancias por conducción a través de la superficie afectada. Esta medida, la cual también se trata de una Solución Basada en la Naturaleza sigue la línea de las actuaciones sostenibles que se han estudiado a lo largo del proyecto.

Aunque el potencial de mejora de esta solución es elevado basándose en los datos estudiados a lo largo de esta memoria, la cubierta se compone de una fina chapa de fibrocemento de apenas 7 centímetros de grosor. Esta estructura tan delicada debería ser estudiada a fondo desde el punto de

vista estructural para evaluar si esta es capaz de soportar el peso de una cubierta verde, la cual debe además de ser diseñada expresamente para el caso concreto que supone el edificio estudiado.

En resumen, la instalación de una cubierta verde en el tejado del edificio sería una Solución Basada en la Naturaleza la cual, además de una serie de mejoras tales como la filtración de aguas o reducción del efecto isla, sería capaz de reducir el consumo energético en las aulas situadas en el primer piso del edificio de forma considerable. No obstante, se tienen dudas al respecto si la estructura del tejado del edificio sería capaz de soportar la carga que supone una cubierta verde, dejando esta opción abierta a estudio para futuras actuaciones.

## CAPITULO 5. CONCLUSIONES

Tras haber llevado a cabo la simulación y el análisis de los resultados obtenidos tras la implementación de diversas Soluciones Basadas en la Naturaleza, se han observado los siguientes comportamientos de los mismos que resultan interesantes desde el punto de vista de la eficiencia energética.

Si se analizan los **efectos del sombreado natural**, el cual solo tiene un efecto notable durante las etapas más cálidas del año debido a la naturaleza caduca del arbolado, se observa de forma directa la reducción de la temperatura de la superficie afectada. Esta reducción de temperatura baja las ganancias de calor a través de las superficies afectadas al interior de las aulas lo que contribuye a una reducción generalizada de la temperatura interior del espacio sobre el que actúan las sombras, reduciendo sus necesidades de refrigeración mientras que se aumentan las de calefacción.

Este efecto se observa especialmente en los muros donde hay mayor incidencia de radiación solar debido a su orientación, como es el caso del muro sureste del AULA 12. Sin embargo, en meses fríos se consigue una reducción de la temperatura superficial aun mayor durante los meses de invierno, lo cual puede resultar problemático.

Tras compararse las demandas de climatización medias para todo el año, se observa que aunque los porcentajes de incremento de demanda de calefacción son mayores que los de reducción de demanda de refrigeración, su peso sobre el consumo total de energía es menor como se evidencia en los valores de demanda de climatización por unidad de área.

Al compararse estos valores con los de las temperaturas superficiales se observa que en los meses en los que hay una reducción importante de temperaturas superficiales se tiene una reducción de la demanda de refrigeración. En el caso del mes de junio, se observa una reducción de la temperatura del muro importante, sin embargo, esta no ha conllevado una reducción equivalente de la demanda de refrigeración siendo más apreciable este comportamiento en meses con climas más suaves.

Tras analizar el **efecto de la Green Wall** como elemento para reducir la temperatura de las superficies, este es más efectivo que el arbolado circundante, gracias a presentar una sombra más localizada que el anterior. En el caso de usar solo la Green Wall sin sombreado, se observan los beneficios que conlleva el uso de hoja caduca, la cual mantiene las superficies más calientes en los meses más fríos mientras que apenas muestra diferencia con respecto al otro tipo de vegetación en los meses más cálidos.

Cuando ya se tiene un elemento de sombra afectando a la superficie sobre la que se instala el muro verde, el efecto de enfriamiento de la misma se ve reducido cuando ya se tiene un elemento de sombra afectando de forma directa la superficie sobre la cual se instala el muro verde, esto se debe a la reducción la velocidad del viento en el muro, lo cual baja la transmisión de calor por convección del mismo.

La combinación de ambas medidas tiene una reducción de la demanda de refrigeración generalizada a lo largo de todo el año, siendo de especial importancia en los meses de abril y mayo, mostrándose una reducción de la demanda media de refrigeración alrededor de un 25%, siendo la Green Wall responsable de casi un 6% de la reducción de demanda durante esos meses. Sin embargo, se tiene un efecto inverso durante ciertos meses más fríos del año aumentando los consumos de calefacción, especialmente durante los meses enero, febrero y marzo siendo la opción menos restrictiva la que emplea vegetación perenne.

Mediante los datos recabados, se deduce que la capacidad para reducir la demanda de climatización para los muros verdes no es tan grande como en el caso de las sombras, a pesar de su excelente capacidad para reducir las temperaturas superficiales sobre las que actúan, siendo su efecto más apreciable cuando son el único elemento de sombra existente.

**Es importante recordar que estas Soluciones Basadas en la Naturaleza tienen beneficios adicionales,** como la bajada de la radiación que reflejan las superficies al exterior debido a la reducción de las temperaturas de las superficies sombreadas, lo cual contribuye a la reducción de la temperatura media de las calles mejorando la sensación de confort urbano. Además de otras ventajas ajenas a la eficiencia energética de edificios como es el caso del aumento de la biodiversidad o la mejora de calidad del aire.

Si se analizan medidas de ahorro adicionales detectadas fruto de la simulación, se obtienen las siguientes observaciones:

- Si se instala una segunda Green Wall en el muro noroeste del AULA 13, se observa que el porcentaje de ahorro adicional por añadir una segunda Green Wall no es tan elevado, especialmente si se tiene en cuenta la mayor superficie que este segundo muro verde presenta, así como la mayor dificultad de su instalación.
- Si se simula la instalación de una Green Wall en el muro sureste del AULA 12, más castigada por el sol, se observa como en los meses más cálidos el efecto únicamente de la Green Wall aporta unas reducciones de las demandas de climatización más que importantes, y aunque esto conlleva también un incremento bastante importante de las demandas de calefacción, en esta orientación del edificio estos valores ya son muy bajos de por sí. En este caso, el efecto combinado de ambas Soluciones Basadas en la Naturaleza sí que se muestra un margen importante de mejora, observándose unas reducciones de las demandas medias de refrigeración a lo largo de los meses de abril y mayo de alrededor del 11% respecto al caso en que solo se tuviera sombreado natural.
- Se ha estudiado la instalación de una cubierta verde en el tejado del edificio, lo cual sería una Solución Basada en la Naturaleza capaz de reducir el consumo energético en las aulas situadas en el primer piso del edificio de forma considerable al ser esta superficie la más afectada por la radiación. No obstante, es necesario llevar a cabo un estudio sobre la capacidad del edificio para soportar la carga que supone una cubierta verde, dejando esta opción abierta a actuaciones.

## BIBLIOGRAFÍA

- Persily, A., & de Jonge, L. (2017). Carbon dioxide generation rates for building occupants. *Indoor Air*, 27(5), 868-879.
- ASHRAE Handbook of Fundamentals (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2009.)
- ASHRAE handbook - fundamentals, Chapter 18, table 8 (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2009).
- Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios (Ministerio de Energía, Industria y Comercio, 2013)
- Hwang, W., Wiseman, P., & Thomas, V. (2015). Tree Planting Configuration Influences Shade on Residential Structures in Four U.S. Cities. *Arboriculture & Urban Forestry*, 41(4), 208-222.
- UNE EN ISO 7726, Anexo F
- Larsen, S., Filippín, C., & Lesino, G. (2014). Thermal Simulation of a Double Skin Façade with Plants. *Energy Procedia*, 57, 1763-1772
- Oliver, J., & Oke, T. (1979). Boundary Layer Climates. *Geographical Review*, 69(4), 486
- Victorero, F., Vera, S., Bustamante, W., Tori, F., Bonilla, C., Gironás, J., & Rojas, V. Experimental Study of the Thermal Performance of Living Walls Under Semiarid Climatic Conditions.
- Oosterlee, J. (2013). Green walls and building energy consumption (Master). Eindhoven University of Technology
- Dover, J. (2015). Green Infrastructure Incorporating Plants and Enhancing Biodiversity in Buildings and Urban Environments. Taylor and Francis
- Gond, V., de Pury, D., Veroustraete, F., & Ceulemans, R. (1999). Seasonal variations in leaf area index, leaf chlorophyll, and water content; scaling-up to estimate fAPAR and carbon balance in a multilayer, multispecies temperate forest. *Tree Physiology*, 19(10), 673-679.
- B.P, (2016). B.P Statistical Review of World Energy.
- Pérez, G., Coma, J., Sol, S., & Cabeza, L. (2017). Green facade for energy savings in buildings: The influence of leaf area index and facade orientation on the shadow effect. *Applied Energy*, 187, 424-437.
- Y. Stav & G. Lawson (2012) Vertical vegetation design decisions and their impact on energy consumption in subtropical cities, *The Sustainable City VII*, Vol. 1, 489-500
- <http://growgreenproject.eu/about/project/>
- <http://mesverdbenicalap.eu/es/que-vamos-a-hacer/>
- <https://ec.europa.eu/research/environment/index.cfm?pg=nbs>
- <https://valencianoticias.com/eu-denuncia-que-el-cp-ciudad-del-artista-fallero-tiene-en-el-patio-una-subestacion-electrica/>
- <https://www.energy.gov/eere/buildings/downloads/energyplus-0>
- <http://xesoview.sourceforge.net/>

- *Energy Plus, (2016). Energy Plus V8.6.0.*
- *IDAE, Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía, (2010). Condiciones climáticas exteriores de proyecto.*
- *IDAE, Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía, (2012). Documento Básico HE; Ahorro de energía.*
- *IDAE, Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía, (2015). Documento de Apoyo al Documento Básico DB-HE; Ahorro de energía.*

## PRESUPUESTO

Para presupuestar el análisis llevado a cabo en este estudio, se contabilizará el equipo usado para la realización del trabajo. Respecto al trabajo personal, se contabilizan las horas empleadas para el informe, así como los desplazamientos llevados a cabo para visitas y reuniones

*Tabla 30. Amortización de los activos empleados en la realización del proyecto*

	<b>Ordenador portátil</b>
<b>Coste (€)</b>	800,00
<b>Horas de uso anuales (h/año)</b>	1095
<b>Vida útil</b>	5 años
<b>Precio (€/h)</b>	0,15

### PRESUPUESTO DESGLOSADO

*Tabla 31. Presupuesto desglosado del proyecto realizado*

	<b>Precio (€/ud.)</b>	<b>Unidad</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Total (€)</b>
<b>Ordenador</b>	0,15	Hora	300	433,88
<b>Visitas</b>	6	Visita	2	12,00
<b>Elaboración del informe</b>	20	Hora	300	6000,00
<b>Reuniones</b>	20	Hora	8	160,00
<b>Impresión del informe</b>	0,05	Página	118	5,90
<b>TOTAL</b>				<b>6.611,78 €</b>

# ANEXO. HORARIOS COMPACTOS DE ENERGYPLUS

## **Ocupación Aulas (fraction)**

Through: 5/31,  
For: Weekdays,  
Until: 9:00,  
0,  
Until: 14:00,  
.9,  
Until: 15:00,  
.2,  
Until: 17:00,  
.9,  
Until: 24:00,  
0,  
For: Saturday Sunday,  
Until: 24:00,  
0,  
Through: 6/30,  
For: Weekdays,  
Until: 9:00,  
0,  
Until: 13:00,  
.9,  
Until: 24:00,  
0,  
For: Saturday Sunday,  
Until: 24:00,  
0,  
Through: 8/31,  
For: AllDays,  
Until: 24:00,  
0,  
Through: 9/30,  
For: Weekdays,  
Until: 9:00,  
0,  
Until: 13:00,  
.9,  
Until: 24:00,  
0,  
For: Saturday Sunday,  
Until: 24:00,

## **Ocupación Común (fraction)**

Through: 5/31,  
For: Weekdays,  
Until: 9:00,  
0,  
Until: 14:00,  
.1,  
Until: 15:00,  
.3,  
Until: 17:00,  
.1,  
Until: 24:00,  
0,  
For: Saturday Sunday,  
Until: 24:00,  
0,  
Through: 6/30,  
For: Weekdays,  
Until: 9:00,  
0,  
Until: 13:00,  
.1,  
Until: 24:00,  
0,  
For: Saturday Sunday,  
Until: 24:00,  
0,  
Through: 8/31,  
For: AllDays,  
Until: 24:00,  
0,  
Through: 9/30,  
For: Weekdays,  
Until: 9:00,  
0,  
Until: 13:00,  
.1,  
Until: 24:00,  
0,  
For: Saturday Sunday,  
Until: 24:00,

0,  
Through: 12/31,  
For: Weekdays,  
Until: 9:00,  
0,  
Until: 14:00,  
.9,  
Until: 15:00,  
.2,  
Until: 17:00,  
.9,  
Until: 24:00,  
0,  
For: Saturday Sunday,  
Until: 24:00,  
0;

**Ocupación Otros (fraction)**

Through: 5/31,  
For: Weekdays,  
Until: 9:00,  
0,  
Until: 14:00,  
.1,  
Until: 15:00,  
0,  
Until: 17:00,  
.1,  
Until: 24:00,  
0,  
For: Saturday Sunday,  
Until: 24:00,  
0,  
Through: 6/30,  
For: Weekdays,  
Until: 9:00,  
0,  
Until: 13:00,  
.1,  
Until: 24:00,  
0,  
For: Saturday Sunday,  
Until: 24:00,  
0,  
Through: 8/31,  
For: AllDays,  
Until: 24:00,  
0,  
Through: 9/30,  
For: Weekdays,

0,  
Through: 12/31,  
For: Weekdays,  
Until: 9:00,  
0,  
Until: 14:00,  
.1,  
Until: 15:00,  
.3,  
Until: 17:00,  
.1,  
Until: 24:00,  
0,  
For: Saturday Sunday,  
Until: 24:00,  
0;

**Luz y Equipos (fraction)**

Through: 5/31,  
For: Weekdays,  
Until: 9:00,  
0,  
Until: 14:00,  
1,  
Until: 15:00,  
0,  
Until: 17:00,  
1,  
Until: 24:00,  
0,  
For: Saturday Sunday,  
Until: 24:00,  
0,  
Through: 6/30,  
For: Weekdays,  
Until: 9:00,  
0,  
Until: 13:00,  
1,  
Until: 24:00,  
0,  
For: Saturday Sunday,  
Until: 24:00,  
0,  
Through: 8/31,  
For: AllDays,  
Until: 24:00,  
0,  
Through: 9/30,  
For: Weekdays,

Until: 9:00,  
0,  
Until: 13:00,  
.1,  
Until: 24:00,  
0,  
For: Saturday Sunday,  
Until: 24:00,  
0,  
Through: 12/31,  
For: Weekdays,  
Until: 9:00,  
0,  
Until: 14:00,  
.1,  
Until: 15:00,  
0,  
Until: 17:00,  
.1,  
Until: 24:00,  
0,  
For: Saturday Sunday,  
Until: 24:00,  
0;

**CONSIGNA CALEFACCIÓN (temperatura)**

Through: 3/31,  
For: Weekdays,  
Until: 9:00,  
-50,  
Until: 14:00,  
21,  
Until: 15:00,  
-50,  
Until: 17:00,  
21,  
Until: 24:00,  
-50,  
For: Saturday Sunday,  
Until: 24:00,  
-50,  
Through: 9/30,  
For: AllDays,  
Until: 24:00,  
-50,  
Through: 12/31,  
For: Weekdays,  
Until: 9:00,  
-50,  
Until: 14:00,

Until: 9:00,  
0,  
Until: 13:00,  
1,  
Until: 24:00,  
0,  
For: Saturday Sunday,  
Until: 24:00,  
0,  
Through: 12/31,  
For: Weekdays,  
Until: 9:00,  
0,  
Until: 14:00,  
1,  
Until: 15:00,  
0,  
Until: 17:00,  
1,  
Until: 24:00,  
0,  
For: Saturday Sunday,  
Until: 24:00,  
0;

**CONSIGNA REFRIGERACIÓN (temperatura)**

Through: 3/31,  
For: AllDays,  
Until: 24:00,  
100,  
Through: 5/31,  
For: Weekdays,  
Until: 9:00,  
100,  
Until: 14:00,  
23,  
Until: 15:00,  
100,  
Until: 17:00,  
23,  
Until: 24:00,  
100,  
For: Saturday Sunday,  
Until: 24:00,  
100,  
Through: 6/30,  
For: Weekdays,  
Until: 9:00,  
100,  
Until: 13:00,

21,  
Until: 15:00,  
-50,  
Until: 17:00,  
21,  
Until: 24:00,  
-50,  
For: Saturday Sunday,  
Until: 24:00,  
-50;

**Transmitancia árboles (fraction)**

Through: 3/31,  
For: AllDays,  
Until: 24:00,  
.825,  
Through: 10/31,  
For: AllDays,  
Until: 24:00,  
.3,  
Through: 12/31,  
For: AllDays,  
Until: 24:00,  
.825;

**Transmitancia GW perenne (fraction)**

Through: 12/31,  
For: AllDays,  
Until: 24:00,  
.2;

**Coef. dee convección perenne (number)**

Through: 1/31,  
For: AllDays,  
Until: 24:00,  
15.918,  
Through: 2/28,  
For: AllDays,  
Until: 24:00,  
16.535,  
Through: 3/31,  
For: AllDays,  
Until: 24:00,  
15.539,  
Through: 4/30,  
For: AllDays,  
Until:24:00,  
15.335,  
Through: 5/31,

23,  
Until: 24:00,  
100,  
For: Saturday Sunday,  
Until: 24:00,  
100,  
Through: 8/31,  
For: AllDays,  
Until: 24:00,  
100,  
Through: 9/30,  
For: Weekdays,  
Until: 9:00,  
100,  
Until: 13:00,  
23,  
Until: 24:00,  
100,  
For: Saturday Sunday,  
Until: 24:00,  
100,  
Through: 12/31,  
For: AllDays,  
Until: 24:00,  
100;

**Transmitancia GW mezcla (fraction)**

Through: 3/31,  
For: AllDays,  
Until: 24:00,  
.512,  
Through: 4/30,  
For: AllDays,  
Until: 24:00,  
.448,  
Through: 5/31,  
For: AllDays,  
Until: 24:00,  
.26,  
Through: 9/30,  
For: AllDays,  
Until: 24:00,  
.2,  
Through: 10/31,  
For: AllDays,  
Until: 24:00,  
.26,  
Through: 11/30,  
For: AllDays,  
Until: 24:00,

For: AllDays,  
Until: 24:00,  
15.276,  
Through: 6/30,  
For: AllDays,  
Until: 24:00,  
15.093,  
Through: 7/31,  
For: AllDays,  
Until: 24:00,  
14.9,  
Through: 8/31,  
For: AllDays,  
Until: 24:00,  
14.897,  
Through: 9/30,  
For: AllDays,  
Until: 24:00,  
14.861,  
Through: 10/31,  
For: AllDays,  
Until: 24:00,  
14.245,  
Through: 11/30,  
For: AllDays,  
Until: 24:00,  
14.881,  
Through: 12/31,  
For: Alldays,  
Until: 24:00,  
14.444;

**Coef. de convección caduca (number)**

Through: 1/31,  
For: AllDays,  
Until: 24:00,  
18.029,  
Through: 2/28,  
For: AllDays,  
Until: 24:00,  
19.032,  
Through: 3/31,  
For: AllDays,  
Until: 24:00,  
17.401,  
Through: 4/30,  
For: AllDays,  
Until:24:00,  
16.757,  
Through: 5/31,

.448,  
Through: 12/31,  
For: AllDays,  
Until: 24:00,  
.512;

**Coef. de convección mezcla (number)**

Through: 1/31,  
For: AllDays,  
Until: 24:00,  
17.172,  
Through: 2/28,  
For: AllDays,  
Until: 24:00,  
18.019,  
Through: 3/31,  
For: AllDays,  
Until: 24:00,  
16.646,  
Through: 4/30,  
For: AllDays,  
Until:24:00,  
16.263,  
Through: 5/31,  
For: AllDays,  
Until: 24:00,  
15.764,  
Through: 6/30,  
For: AllDays,  
Until: 24:00,  
15.093,  
Through: 7/31,  
For: AllDays,  
Until: 24:00,  
14.9,  
Through: 8/31,  
For: AllDays,  
Until: 24:00,  
14.897,  
Through: 9/30,  
For: AllDays,  
Until: 24:00,  
14.861,  
Through: 10/31,  
For: AllDays,  
Until: 24:00,  
14.555,  
Through: 11/30,  
For: AllDays,  
Until: 24:00,

For: AllDays,  
Until: 24:00,  
16.676,  
Through: 6/30,  
For: AllDays,  
Until: 24:00,  
15.093,  
Through: 7/31,  
For: AllDays,  
Until: 24:00,  
14.9,  
Through: 8/31,  
For: AllDays,  
Until: 24:00,  
14.897,  
Through: 9/30,  
For: AllDays,  
Until: 24:00,  
14.861,  
Through: 10/31,  
For: AllDays,  
Until: 24:00,  
14.411,  
Through: 11/30,  
For: AllDays,  
Until: 24:00,  
16.084,  
Through: 12/31,  
For: Alldays,  
Until: 24:00,  
15.637;

15.667,  
Through: 12/31,  
For: Alldays,  
Until: 24:00,  
15.153;

**Transmitancia GW caduca (fraction)**

Through: 3/31,  
For: AllDays,  
Until: 24:00,  
.825,  
Through: 10/31,  
For: AllDays,  
Until: 24:00,  
.2,  
Through: 12/31,  
For: AllDays,  
Until: 24:00,  
.825;