



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)
INGENIERO INDUSTRIAL

Simulaciones Energéticas de Edificios con Datos Físicos 3D de la Ciudad de Austin para Evaluación de la Demanda Energética y Análisis del Crecimiento de Población

Autor: Nicolás Castillo Castejón
Director: José Ramón Vázquez Canteli

Madrid
Julio 2018

Nicolás
Castillo
Castejón

**Simulaciones Energéticas de Edificios con Datos Físicos 3D de la Ciudad de Austin
para Evaluación de la Demanda Energética y Análisis del Crecimiento de Población**



AUTORIZACIÓN PARA LA DIGITALIZACIÓN, DEPÓSITO Y DIVULGACIÓN EN RED DE PROYECTOS FIN DE GRADO, FIN DE MÁSTER, TESINAS O MEMORIAS DE BACHILLERATO

1º. Declaración de la autoría y acreditación de la misma.

El autor D. **NICOLÁS CASTILLO CASTEJÓN** DECLARA ser el titular de los derechos de propiedad intelectual de la obra: **SIMULACIONES ENERGÉTICAS DE EDIFICIOS CON DATOS FÍSICOS 3D DE LA CIUDAD DE AUSTIN PARA EVALUACIÓN DE LA DEMANDA ENERGÉTICA Y ANÁLISIS DEL CRECIMIENTO DE POBLACIÓN**, que ésta es una obra original, y que ostenta la condición de autor en el sentido que otorga la Ley de Propiedad Intelectual.

2º. Objeto y fines de la cesión.

Con el fin de dar la máxima difusión a la obra citada a través del Repositorio institucional de la Universidad, el autor **CEDE** a la Universidad Pontificia Comillas, de forma gratuita y no exclusiva, por el máximo plazo legal y con ámbito universal, los derechos de digitalización, de archivo, de reproducción, de distribución y de comunicación pública, incluido el derecho de puesta a disposición electrónica, tal y como se describen en la Ley de Propiedad Intelectual. El derecho de transformación se cede a los únicos efectos de lo dispuesto en la letra a) del apartado siguiente.

3º. Condiciones de la cesión y acceso

Sin perjuicio de la titularidad de la obra, que sigue correspondiendo a su autor, la cesión de derechos contemplada en esta licencia habilita para:

- a) Transformarla con el fin de adaptarla a cualquier tecnología que permita incorporarla a internet y hacerla accesible; incorporar metadatos para realizar el registro de la obra e incorporar “marcas de agua” o cualquier otro sistema de seguridad o de protección.
- b) Reproducir la en un soporte digital para su incorporación a una base de datos electrónica, incluyendo el derecho de reproducir y almacenar la obra en servidores, a los efectos de garantizar su seguridad, conservación y preservar el formato.
- c) Comunicarla, por defecto, a través de un archivo institucional abierto, accesible de modo libre y gratuito a través de internet.
- d) Cualquier otra forma de acceso (restringido, embargado, cerrado) deberá solicitarse expresamente y obedecer a causas justificadas.
- e) Asignar por defecto a estos trabajos una licencia Creative Commons.
- f) Asignar por defecto a estos trabajos un HANDLE (URL *persistente*).

4º. Derechos del autor.

El autor, en tanto que titular de una obra tiene derecho a:

- a) Que la Universidad identifique claramente su nombre como autor de la misma
- b) Comunicar y dar publicidad a la obra en la versión que ceda y en otras posteriores a través de cualquier medio.
- c) Solicitar la retirada de la obra del repositorio por causa justificada.
- d) Recibir notificación fehaciente de cualquier reclamación que puedan formular terceras personas en relación con la obra y, en particular, de reclamaciones relativas a los derechos de propiedad intelectual sobre ella.

5º. Deberes del autor.

El autor se compromete a:

- a) Garantizar que el compromiso que adquiere mediante el presente escrito no infringe ningún derecho de terceros, ya sean de propiedad industrial, intelectual o cualquier otro.
- b) Garantizar que el contenido de las obras no atenta contra los derechos al honor, a la intimidad y a la imagen de terceros.
- c) Asumir toda reclamación o responsabilidad, incluyendo las indemnizaciones por daños, que

podieran ejercitarse contra la Universidad por terceros que vieran infringidos sus derechos e intereses a causa de la cesión.

- d) Asumir la responsabilidad en el caso de que las instituciones fueran condenadas por infracción de derechos derivada de las obras objeto de la cesión.

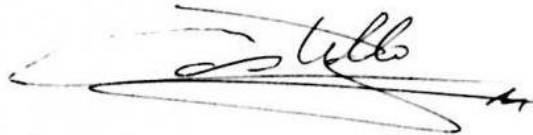
6º. Fines y funcionamiento del Repositorio Institucional.

La obra se pondrá a disposición de los usuarios para que hagan de ella un uso justo y respetuoso con los derechos del autor, según lo permitido por la legislación aplicable, y con fines de estudio, investigación, o cualquier otro fin lícito. Con dicha finalidad, la Universidad asume los siguientes deberes y se reserva las siguientes facultades:

- La Universidad informará a los usuarios del archivo sobre los usos permitidos, y no garantiza ni asume responsabilidad alguna por otras formas en que los usuarios hagan un uso posterior de las obras no conforme con la legislación vigente. El uso posterior, más allá de la copia privada, requerirá que se cite la fuente y se reconozca la autoría, que no se obtenga beneficio comercial, y que no se realicen obras derivadas.
- La Universidad no revisará el contenido de las obras, que en todo caso permanecerá bajo la responsabilidad exclusiva del autor y no estará obligada a ejercitar acciones legales en nombre del autor en el supuesto de infracciones a derechos de propiedad intelectual derivados del depósito y archivo de las obras. El autor renuncia a cualquier reclamación frente a la Universidad por las formas no ajustadas a la legislación vigente en que los usuarios hagan uso de las obras.
- La Universidad adoptará las medidas necesarias para la preservación de la obra en un futuro.
- La Universidad se reserva la facultad de retirar la obra, previa notificación al autor, en supuestos suficientemente justificados, o en caso de reclamaciones de terceros.

Madrid, a 15 de Julio de 2018

ACEPTA

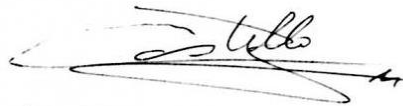


Fdo. NICOLÁS CASTILLO CASTEJÓN

Motivos para solicitar el acceso restringido, cerrado o embargado del trabajo en el Repositorio Institucional:

Declaro, bajo mi responsabilidad, que el Proyecto presentado con el título
**Simulaciones Energéticas de Edificios con Datos Físicos 3D de la Ciudad
de Austin para Evaluación de la Demanda Energética y Análisis del
Crecimiento de Población**

en la ETS de Ingeniería - ICAI de la Universidad Pontificia Comillas en el
curso académico 2017/2018 es de mi autoría, original e inédito y
no ha sido presentado con anterioridad a otros efectos. El Proyecto no es
plagio de otro, ni total ni parcialmente y la información que ha sido tomada
de otros documentos está debidamente referenciada.



Fdo.: Nicolás Castillo Castejón Fecha: 22/05/2018

Autorizada la entrega del proyecto
EL DIRECTOR DEL PROYECTO

Fdo.: José Ramón Vázquez Canteli

Fecha: 22/05/2018





ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)
INGENIERO INDUSTRIAL

Simulaciones Energéticas de Edificios con Datos Físicos 3D de la Ciudad de Austin para Evaluación de la Demanda Energética y Análisis del Crecimiento de Población

Autor: Nicolás Castillo Castejón
Director: José Ramón Vázquez Canteli

Madrid
Julio 2018

Nicolás
Castillo
Castejón

**Simulaciones Energéticas de Edificios con Datos Físicos 3D de la Ciudad de Austin
para Evaluación de la Demanda Energética y Análisis del Crecimiento de Población**



Simulaciones Energéticas de Edificios con Datos Físicos 3D de la Ciudad de Austin para Evaluación de la Demanda Energética y Análisis del Crecimiento de Población

Autor: Castillo Castejón, Nicolás

Director: Vázquez Canteli, José Ramón

Entidad colaboradora: Intelligent Environments Laboratory (The University of Texas at Austin)

Resumen del Proyecto

Introducción

Se espera que casi el 90% de la población de los países desarrollados viva en áreas urbanas en 2050, presentando un crecimiento del número de habitantes de las ciudades de casi dos millones por semana hasta 2030 (United Nations, 2014). Este crecimiento puede conllevar consecuencias severas tanto para el medio ambiente como para la calidad de vida de la población, pues los edificios son una de las principales fuentes de polución, representando alrededor del 40% de la demanda energética global en los países desarrollados (Hani, et al., 2012). Los edificios son responsables de un porcentaje importante de las emisiones de gases de efecto invernadero, produciendo alrededor del 38% del CO₂ que se emite a la atmósfera, además de otros problemas medioambientales relacionados con la contaminación del agua y de la creación de residuos de construcción (Pérez-Lombard, et al., 2008).

Las simulaciones energéticas de edificios a escala urbana son una herramienta útil para obtener información acerca del potencial comportamiento energético que las ciudades pueden lograr. Es posible evaluar la evolución energética de las ciudades mediante el modelado de escenarios que representen las futuras características de los edificios. Estas simulaciones pueden considerar diferentes niveles de aislamiento de acuerdo a códigos

existentes y a estándares sostenibles, haciendo posible evaluar el ahorro energético que estos estándares pueden ofrecer.

El objetivo de este trabajo es describir la metodología necesaria para construir un modelo físico y 3D de los edificios de un distrito de la ciudad de Austin, para así llevar a cabo simulaciones energéticas para diferentes sectores de edificios, con el objetivo de analizar el ahorro energético que se puede obtener a partir de diferentes niveles de aislamiento obtenidos de acuerdo a estándares LEED, y estudiar el incremento de la demanda energética asociado a un crecimiento de la población en el distrito.

Metodología

Una base de datos con los datos geométricos de los edificios de un distrito de la ciudad de Austin es creada utilizando información proporcionada por el gobierno de Condado de Travis. La base de datos es desarrollada utilizando PostgreSQL, que permite la organización de todos los datos en tablas, tal como se muestra en la Figura 1.

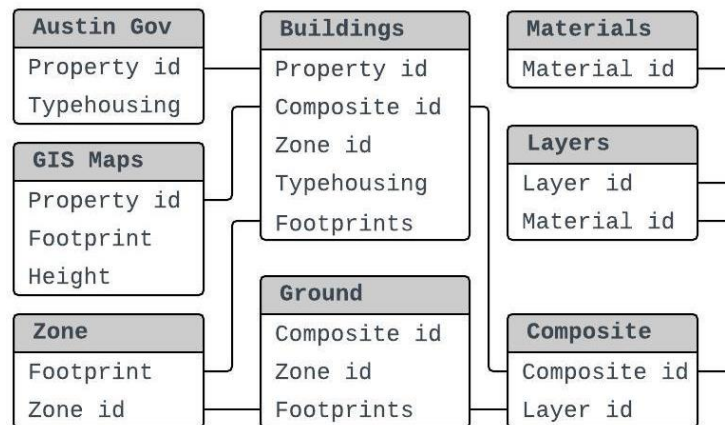


Figura 1: Estructura de la base de datos (diagrama simplificado).

La base de datos fue completada con los datos físicos de los edificios (materiales de construcción, propiedades de las ventanas, ratios de ventilación, etc.), estimados a partir de códigos energéticos existentes y asignados a cada uno de los edificios a partir de su año de construcción y del tipo de edificio (residencial, oficinas, comercial, etc.). A partir de este escenario base se desarrollaron dos estudios diferentes e independientes.

En primer lugar, se desarrollaron tres modelos para evaluar la reducción de la demanda energética proporcionada por la implementación de estándares sostenibles LEED a un grupo de viviendas unifamiliares. ‘Leadership in Energy and Environmental Design’ (LEED) es el estándar sostenible más utilizado en todo el mundo. En este sistema, los edificios reciben una puntuación en base a diferentes criterios, como el nivel de aislamiento de muros y tejados, las características de las ventanas, su equipamiento o su sistema de distribución de agua entre otros. Usando este sistema, las viviendas residenciales pueden ser clasificadas en cuatro grupos diferentes dependiendo de su puntuación, tal como se presenta en la Tabla 1.

Tabla 1: Categorías LEED por puntuación.

Categorías	Puntos Requeridos
Certified	40 - 49
Silver	50 - 59
Gold	60 - 79
Platinum	80 - 110

Siguiendo los estándares LEED, las características de los edificios asociadas a los materiales de construcción de muros y tejados, las ventanas y los ratios de ventilación fueron modificadas para desarrollar tres nuevos modelos (Usual Improvement, LEED Silver y LEED Gold) que pueden ser utilizados para llevar a cabo simulaciones energéticas.

El segundo estudio consiste en el análisis del impacto energético que tendría la construcción de edificios de mayor altura, construidos como solución al crecimiento de la población en el distrito. Diferentes modelos fueron creados aumentando el número de pisos de un grupo de edificios de apartamentos, para analizar la evolución de la demanda energética tanto para los nuevos edificios como para los edificios ya existentes.

Finalmente, un archivo XML con las características de los modelos es creado. Para llevar a cabo las simulaciones energéticas se utiliza el software CitySim Pro, desarrollado en

EPFL, que lee el documento XML junto con otro archivo, que contiene la información climática de la ciudad de Austin, y lleva a cabo las simulaciones. Los resultados son presentados como un archivo de texto que contiene la demanda energética horaria de todos los edificios desglosada por pisos. La Figura 2 muestra el modelo 3D y físico de un grupo de edificios de la ciudad de Austin.

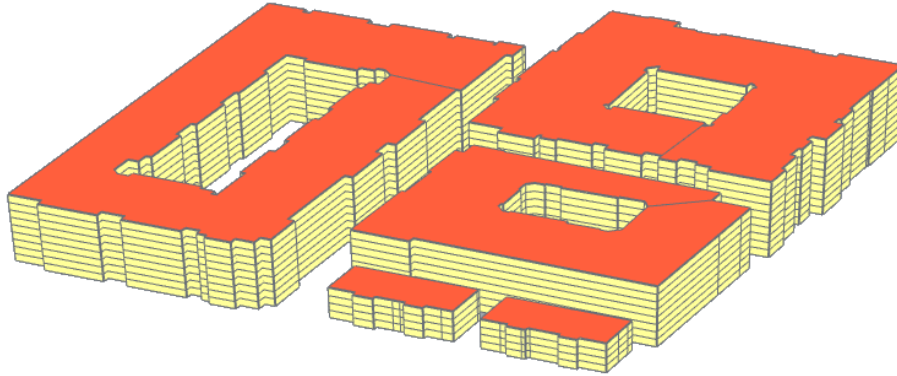


Figura 2: modelo 3D y físico de un grupo de edificios de la ciudad de Austin.

Resultados

Los resultados de las simulaciones LEED para los escenarios base y LEED Gold para las estaciones de verano y de invierno se muestran en la Figura 3 y en la Figura 4 respectivamente. La aplicación de estos estándares proporciona un potencial ahorro energético de casi el 60% para las horas en las que la demanda energética alcanza su valor máximo. Sin embargo, cuando la diferencia entre la temperatura interior y la temperatura exterior es mínima, los estándares LEED no proporcionan una reducción en la demanda energética.

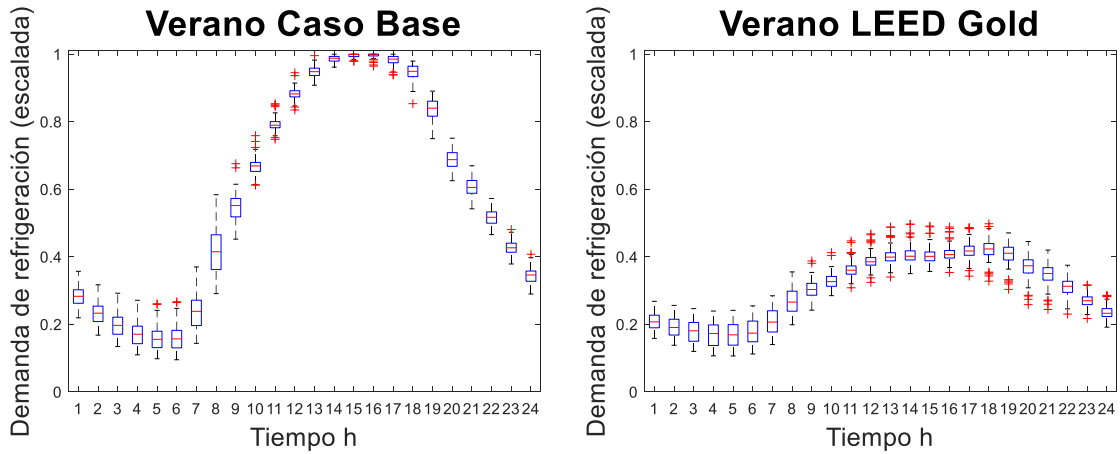


Figure 3: Demanda de refrigeración en verano para los casos Base y LEED Gold.

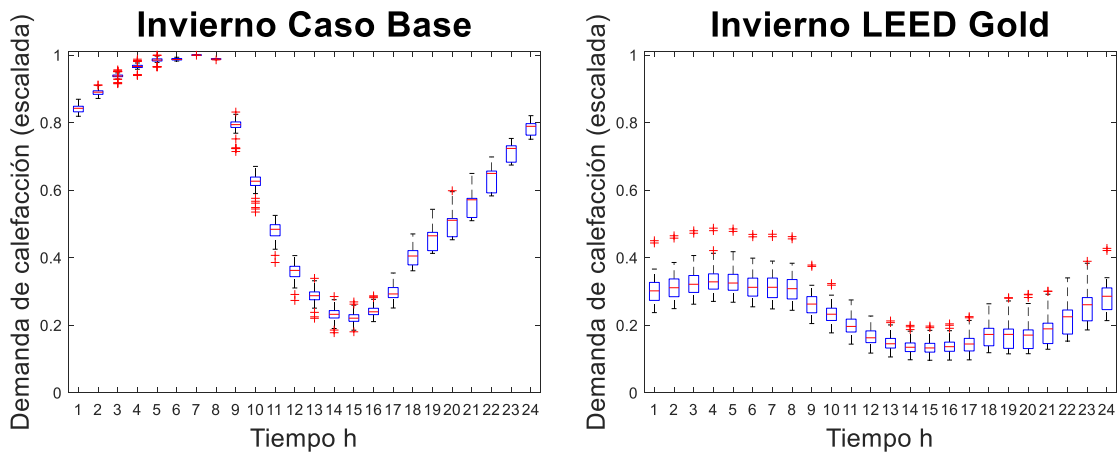


Figure 4: Demanda de calefacción en invierno para los casos Base y LEED Gold.

La Figura 5 muestra la evolución del consumo de electricidad en función del crecimiento de la población por estación del distrito. La construcción de edificios de mayor altura proporciona una mejora significativa de la eficiencia energética de los edificios, Un aumento del 60% de la población se traduce en un incremento del consumo de electricidad entre el 40% y el 50%. Considerando el consumo por ocupante, la mejora de la eficiencia obtenida es de casi un 20%.

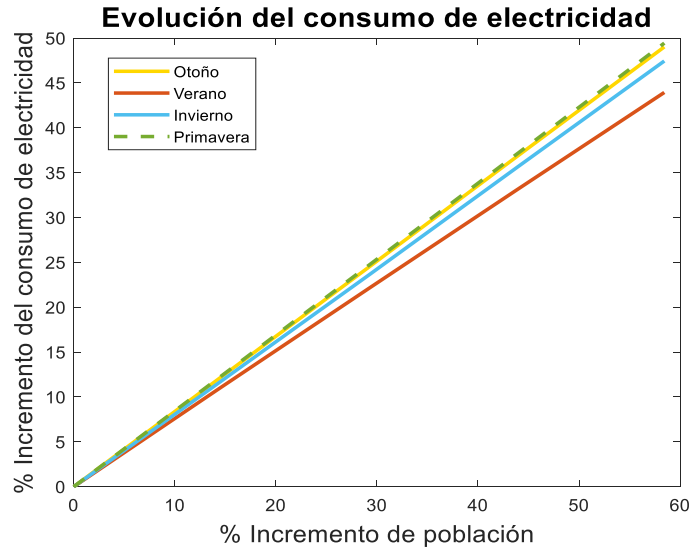


Figura 5: Incremento del consumo de electricidad vs Aumento de la población.

Conclusión

Las simulaciones energéticas de edificios una herramienta muy útil a la hora de predecir la demanda térmica y eléctrica a escala urbana. El desarrollo de modelos 3D permite la consideración de factores geométricos y arquitectónicos, lo que significa una ventaja importante en la planificación del crecimiento urbano de las ciudades. El potencial de las simulaciones energéticas de edificios reside no solo en predecir la demanda energética actual, sino en la posibilidad de construir escenarios que representen los diferentes futuros energéticos a los que la ciudad y sus edificios pueden hacer frente. Estos escenarios pueden representar situaciones como las variaciones del cambio climático, el aumento exponencial de los habitantes en una zona específica de la ciudad, la construcción de nuevos edificios más modernos y de mayor altura o, incluso, la combinación de varios de estos factores. El sector residencial es adecuado para llevar a cabo este tipo de simulaciones ya que el modelado de los perfiles de ocupación y uso de electrodomésticos, así como la caracterización del equipamiento y la potencia instalado son más sencillos que en otros sectores.

La aplicación de estándares LEED a edificios unifamiliares ya existentes reduce drásticamente el consumo energético de los edificios. Este ahorro se consigue mejorando las ventanas, los tejados, los muros y los ratios de ventilación natural. Sin embargo, durante

las épocas del año donde la diferencia de temperatura entre el exterior y el interior de las viviendas no es excesivamente elevada, el impacto de estas modificaciones se ve severamente reducido debido a la influencia que la actividad de los ocupantes (independiente de cualquier reforma que se realice a los edificios) tiene en la demanda energética final, ya que posee un peso similar al que tiene la demanda térmica. Por lo tanto, las condiciones climáticas son un factor clave a la hora de valorar la implementación de medidas LEED, siendo Austin una ciudad apropiada para la implantación de dichos estándares pues posee unas condiciones climáticas con temperaturas extremas (especialmente calurosas durante un tercio del año) y muchas horas donde la radiación solar incide directamente sobre los edificios.

Por otro lado, el crecimiento vertical de la ciudad, producido por la construcción de nuevos edificios con una mayor altura, permite la concentración de un mayor número de habitantes dentro del área urbana de la ciudad, a la vez que mejora la eficiencia energética de la ciudad. Incluso si las nuevas construcciones mantienen las características actuales de los edificios, el consumo energético por habitante se vería reducido debido a que las superficies de los edificios (y con ello las pérdidas térmicas) aumentan en una proporción menor a la que lo hace el número de habitantes. Además, en zonas climáticas calurosas, los efectos de las interacciones que se producen entre edificios cercanos pueden ser explotados para reducir la demanda de refrigeración, aumentando el ahorro energético potencial.

Referencias

- Hani, A., & Koiv, T.-A. (2012). *Energy Consumption Monitoring Analysis for Residential Educational and Public Buildings*. Tallinn University of Technology.
- Pérez-Lombard, L., Ortiz, J., & Pout, C. (2008). *A Review on Buildings Energy Consumption Information*, Vol. 40, No. 3, pp. 394-398.
- United Nations. (2014). *World Urbanization Prospects, the 2014 Revision*. United Nations, Department of Economic and Social Affairs.

Building Energy Simulations with 3D physical data of the City of Austin for Energy Demand Assessment and Population Growth Analysis

Author: Castillo Castejón, Nicolás

Director: Vázquez Canteli, José Ramón

Collaborator entity: Intelligent Environments Laboratory (The University of Texas at Austin)

Abstract of the Project

Introduction

It is expected that almost 90% of the population of developed countries will live in urban areas by 2050, with a growth rate of city-dwellers of almost two million per week until 2030 (United Nations, 2014). This growth can cause severe consequences for the environment and for the quality of life of the population as buildings are a major source of pollution, currently representing about 40% of the global energy demand in developed countries (Hani, et al., 2012). Buildings are responsible for an important percentage of the greenhouse gas emissions, producing around 38% of the CO₂ emitted into the atmosphere, in addition to other environmental problems related with the water use and the construction waste (Pérez-Lombard, et al., 2008).

Building energy simulations at the urban scale is a useful tool to obtain information about the potential energy behaviour that cities can achieve. It is possible to evaluate the energy evolution of cities by modelling scenarios that recreate the future characteristics of the buildings. These simulations can consider different refurbishment levels according to existing codes and green standards, making it possible to evaluate the energy savings potential that these standards can offer.

The contribution of this paper is to describe the methodology to build the 3D physical model of the buildings of a district of the city of Austin and perform energy simulations

for different buildings sectors to analyse the energy savings potential for diverse refurbishment levels according to LEED standards, and study the energy demand increase associated with a population growth in the district.

Methodology

A database with the geometrical data of the buildings of a district of the City of Austin was created using information provided by the government of the County of Travis. The database was developed using PostgreSQL, and all the information was organized in tables, as shown in Figure 1. The database was completed with physical information of the buildings (materials of construction, properties of windows, infiltration rates, etc.) obtained from existing codes and assigned to the buildings from their year of construction and their occupancy type (residential, retail or office). From this base case scenario two different studies were developed.

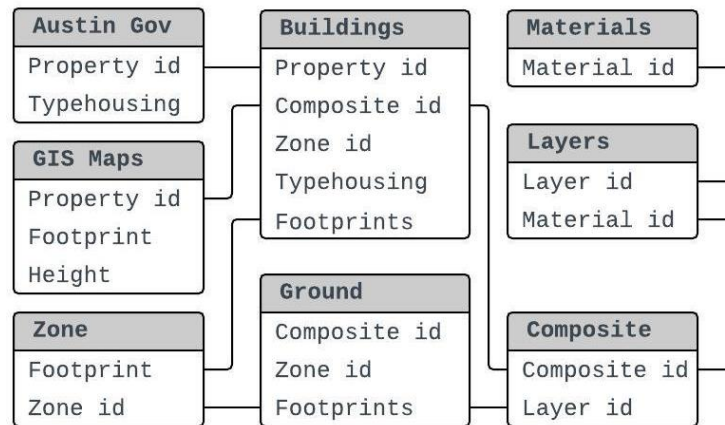


Figure 1: Database structure (simplified diagram).

In first place, three models were developed to assess the energy demand reduction provided by the implementation of Leadership in Energy and Environmental Design (LEED) standards to single family residential buildings. LEED is the most used green building rating system in the world. Within this rating system, buildings receive scores based on different criteria, such as the materials of construction, the energy efficiency of their appliances, or their water distribution system. Using this rating, residential buildings can be classified in four different groups, depending of their score, as presented in Table 1.

Table 1: LEED categories by score.

Categorías	Puntos Requeridos
Certified	40 - 49
Silver	50 - 59
Gold	60 - 79
Platinum	80 - 110

Following LEED standards, the characteristics of the buildings associated with the materials of construction of walls and roofs, the windows and the infiltration rates were modified in order to develop three new models (business as usual, LEED Silver and LEED Gold) that can be used to perform building energy simulation.

The second study consists on the analysis of the energy impact of the construction of higher buildings as a response to the population growth in the district. Several models were created increasing the number of floors of multifamily residential buildings, in order to observe the evolution of the energy demand of the new and the existing buildings of the district.

Finally, an XML file with the characteristics of the models was created. The software CitySim Pro, developed at EPFL, uses the XML file and another file with the climate information of the City of Austin to perform the energy simulations. Después the simulations CitySim Pro returns a text file with the energy demand by floor of the buildings on an hourly basis. Figure 2 shows the 3D and physical model of a sample of buildings of the City of Austin.

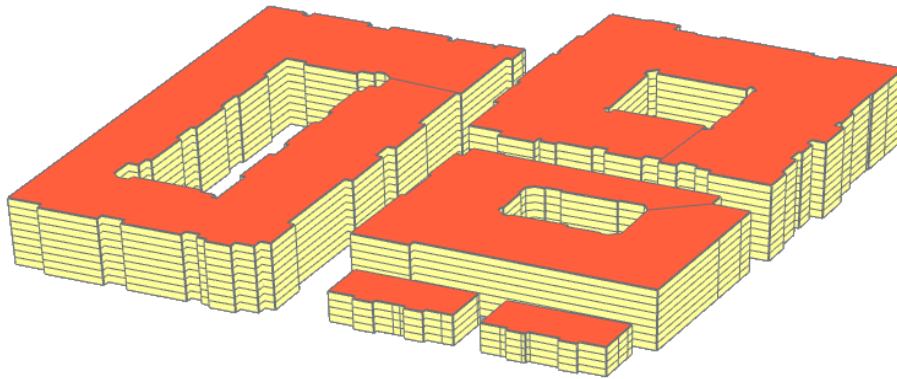


Figure 2: 3D model of a sample of building of the City of Austin.

Results

The results of the LEED simulations for the base case and the LEED Gold scenarios for Summer and Winter are shown in Figure 3 and Figure 4 respectively. The application of LEED standards to single family buildings provides a potential energy reduction of around 60% for the hours when the demand reaches its peak value. However, when the difference between the indoor and outdoor temperatures is minimum the LEED standards do not provide a reduction in the energy demand.

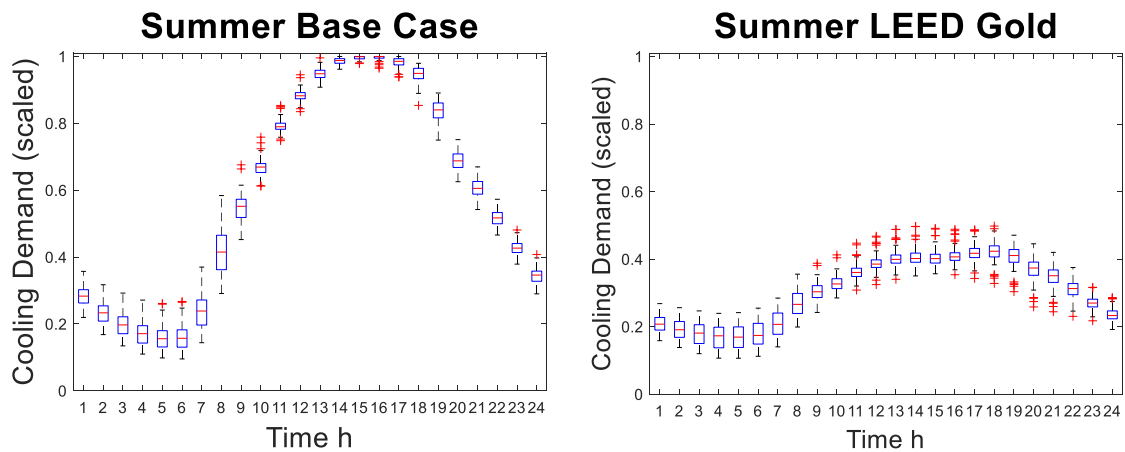


Figure 3: Cooling demand for Summer Base Case vs LEED Gold scenarios.

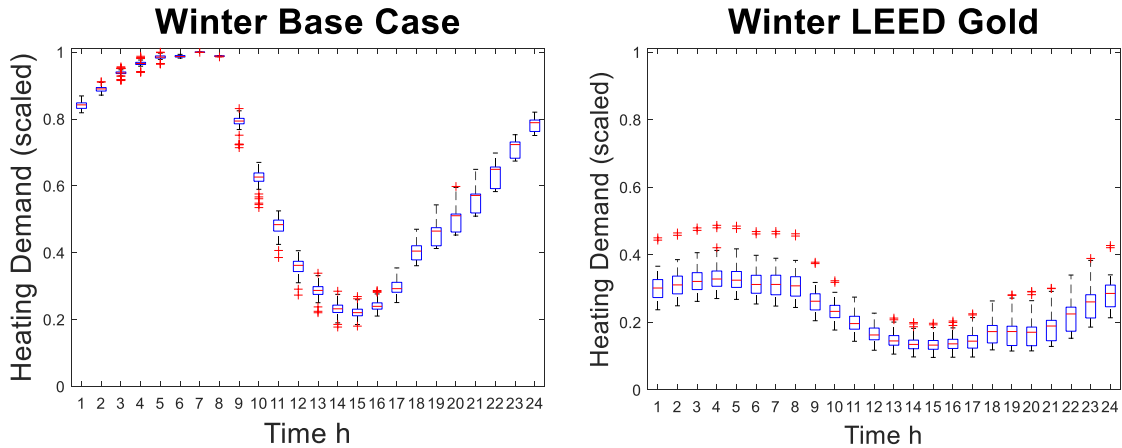


Figure 4: Heating demand for Winter Base Case vs LEED Gold scenarios.

Figure 5 shows the electric consumption evolution by season against the population growth of the district. The construction of higher buildings provides a significant improvement of the energy efficiency of the buildings. An increase of 60% of the population translates into an increase of the electricity consumption between 40% and 50%. Considering the energy consumption by occupant, an efficiency improvement of almost 20% is achieved.

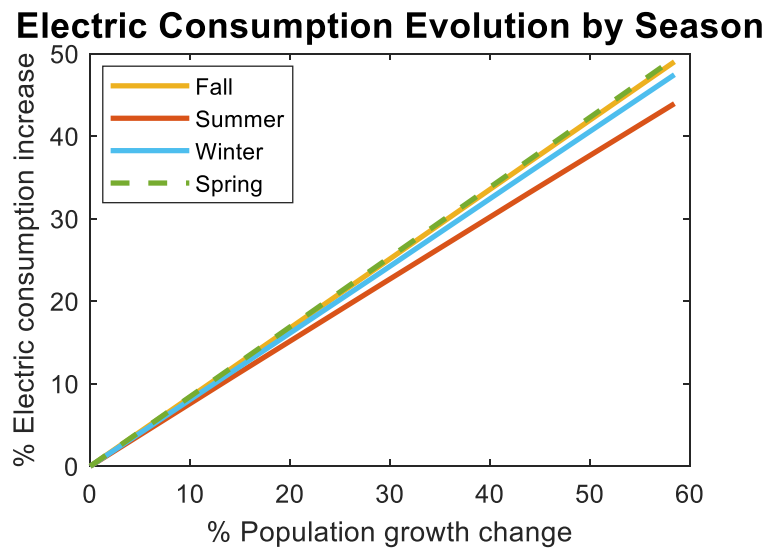


Figure 5: Electric consumption evolution by season vs population growth change.

Conclusion

Building energy simulations using 3D and physical models is a powerful tool because we can consider geometrical and architectural factors, which can provide major advantages

when planning the urban development of the city. The potential of the simulations lies not only in estimating the energy demand behaviour of current scenarios, but also in recreating situations that represent the prospective energy situation of the city. Residential buildings are adequate to perform the energy simulations, because it is easier to estimate the power for lighting and appliances, as well as the probability profiles for occupancy and usage of devices.

The application of LEED standards to single family homes drastically reduces the energy consumption of the buildings by improving the windows, the roofs, the walls and the infiltration rates. However, during seasons where the difference between indoor and outdoor temperatures is minimum, the impact of these modifications is severely reduced because of the behaviour of the occupants. During these seasons, the impact of the activities of the occupants is similar to that of the thermal comfort requirements, so climatic conditions are a major factor when considering the application of LEED standards.

The vertical growth of the district produced by the construction of higher buildings provides a solution to the population growth of cities while increasing the energy efficiency. Even if the new constructions maintain the characteristics of the existing buildings, the energy consumption per occupant would be reduced. In addition, in hot climatic zones, the shadowing interactions between the buildings can be exploited to reduce the cooling demand, improving the final energy savings potential.

References

- Hani, A., & Koiv, T.-A. (2012). *Energy Consumption Monitoring Analysis for Residential Educational and Public Buildings*. Tallinn University of Technology.
- Pérez-Lombard, L., Ortiz, J., & Pout, C. (2008). *A Review on Buildings Energy Consumption Information*, Vol. 40, No. 3, pp. 394-398.
- United Nations. (2014). *World Urbanization Prospects, the 2014 Revision*. United Nations, Department of Economic and Social Affairs.

Agradecimientos

Me gustaría expresar mi más sincera gratitud al director de este proyecto José Ramón Vázquez Canteli, gracias por toda la ayuda y la paciencia con la que me has guiado durante todo este año. También me gustaría agradecer a Zoltan Nagy por darme la oportunidad de formar parte de un increíble grupo de trabajo y a Rachel Lynn Schutte por ayudarme en la creación de la base de datos.

Gracias a mi familia por toda la ayuda que me ha proporcionado a lo largo de los últimos seis años, por darme la oportunidad de lograr todo aquello que me he propuesto.

En último lugar, quiero agradecer a todos los amigos con los que he coincidido en Austin.

Tabla de contenidos

Lista de Figuras	iii
Lista de Tablas	v
1 Introducción	1
2 Metodología	5
2.1 Creación de la base de datos	5
1.1.1 Estructura de la base de datos	5
1.1.2 Mapas GIS	6
1.1.3 Caracterización de los edificios	7
1.1.4 Distrito de West Campus	8
2.2 Escenarios LEED para viviendas unifamiliares	9
2.2.1 Características de los muros.....	10
2.2.2 Características de las ventanas.....	12
2.2.3 Ventilación natural.....	13
2.2.4 Características de los tejados	14
2.2.5 Resumen de las puntuaciones	15
2.3 Crecimiento de población en edificios multifamiliares.....	15
2.4 Modelo geométrico 3D con datos físicos de los edificios.....	17
3 Resultados y Discusión	23
3.1 Simulaciones LEED	23
3.2 Análisis del crecimiento de la población.....	29
4 Conclusión	35
Referencias.....	37
Anexo I: Materiales y Compuestos.....	39

Anexo II: Código SQL para crear las tablas de los edificios y de las superficies y comandos para adaptar la base de datos a los diferentes escenarios.....	45
Anexo III: Código Matlab para organizar los datos de las simulaciones por edificio y por estación	55
Anexo IV: Código de matlab para representar los resultados LEED por estación.....	65
Anexo V: Código Matlab para representar los resultados de aumento de la población ...	69

Lista de Figuras

Figura 1: Estructura de la base de datos (diagrama simplificado).....	6
Figura 2: Mapas GIS de las parcelas y los edificios de Austin.....	7
Figura 3: Mapa GIS de las superficies y los edificios de West Campus.	8
Figura 4: Modelo 3D de un edificio tras aumentar el número de alturas.	17
Figura 5: Modelo 3D de un grupo de edificios del distrito de West Campus antes y después de realizar las simulaciones.	18
Figura 6: Modelo de edificios con y sin pisos.	19
Figura 7: Demanda térmica de refrigeración y de calefacción de los modelos con y sin pisos.	20
Figura 8: Demanda térmica para calefacción de otoño para viviendas unifamiliares (1).	23
Figura 9: Demanda térmica para calefacción de otoño para viviendas unifamiliares (2).	24
Figura 10: Demanda térmica para calefacción de invierno para viviendas unifamiliares (1).	24
Figura 11: Demanda térmica para calefacción de invierno para viviendas unifamiliares (2).	24
Figura 12: Demanda térmica para refrigeración de primavera para viviendas unifamiliares (1).....	26
Figura 13: Demanda térmica para refrigeración de primavera para viviendas unifamiliares (2).....	26
Figura 14: Demanda térmica para refrigeración de verano para viviendas unifamiliares (1).	26

Figura 15: Demanda térmica para refrigeración de verano para viviendas unifamiliares (2).	27
Figura 16: Distribución del factor R^2 ajustado para la demanda térmica de refrigeración utilizando ΔT como regresor.	28
Figura 17: Distribución del factor R^2 ajustado para la demanda térmica de refrigeración utilizando ΔT como regresor.	28
Figura 18: Evolución de la demanda de calefacción vs Crecimiento de la población en % por estación.	29
Figura 19: Evolución de la demanda de refrigeración vs Crecimiento de la población en % por estación.	30
Figura 20: Evolución de la demanda de refrigeración vs Crecimiento de la población de un edificio por estación, con y sin edificios alrededor.....	31
Figura 21: Evolución de la demanda de calefacción vs Crecimiento de la población de un edificio por estación, con y sin edificios alrededor.....	32
Figura 22: Evolución de la demanda eléctrica vs Crecimiento de la población en % por estación.	34

Lista de Tablas

Tabla 1: Categorías LEED para edificios residenciales (con puntuación).	9
Tabla 2: Características de los muros para los diferentes modelos.	11
Tabla 3: Características de las ventanas para los diferentes modelos.....	12
Tabla 4: Valores de la ventilación natural para los diferentes modelos.	13
Tabla 5: Características de los tejados para los diferentes modelos.	14
Tabla 6: Puntuación LEED para cada modelo.....	15
Tabla 7: Propiedades los materiales de muros y tejados de los edificios multifamiliares.	16
Tabla 8: Propiedades de las ventanas de los edificios multifamiliares.....	16
Tabla 9: Diferencia en el incremento de la demanda térmica entre el modelo 1 y el modelo 2 $(Q_1-Q_2)/Q_1$	33
Tabla 10: Propiedades de los materiales de la base de datos 1980-1989.....	39
Tabla 11: Propiedades de los materiales de la base de datos 1990-1999.....	40
Tabla 12: Propiedades de los materiales de la base de datos 2000-2009.....	41
Tabla 13: Propiedades de los materiales de la base de datos 2010-Presente.....	42
Tabla 14: Características de muros, tejados y ventanas por tipo de edificio.	43

1 Introducción

Se espera que alrededor del 90% de la población de los países desarrollados este concentrada en áreas urbanas en 2050, presentando un crecimiento del número de habitantes de las ciudades de casi dos millones por semana, manteniéndose constante hasta 2030 (United Nations, 2014). Este crecimiento puede conllevar severas consecuencias, tanto para el medio ambiente como para la calidad de vida de los habitantes, pues los edificios son una de las principales fuentes de polución en la actualidad.

Se estima que los edificios suponen alrededor del 40% de la demanda energética total de los países desarrollados (Hani & Koiv, 2012). Los edificios son responsables de un porcentaje alto de las emisiones de gases de efecto invernadero, produciendo alrededor del 38% de CO₂ emitido a la atmósfera, sumado a otros problemas medioambientales relacionados con la contaminación y el malgasto de agua potable, y con la producción de residuos derivados de la construcción (Pérez-Lombard, Ortiz, & Pout, 2008). Como respuesta, algunos de los gobiernos de las ciudades más importantes del mundo están estableciendo objetivos ambiciosos para reducir el impacto medioambiental de los edificios. Por ejemplo, ciudades como Nueva York o Boston han desarrollado planes para reducir un 80% sus emisiones de gases de efecto invernadero para 2050 (City of Boston, 2014). Para aumentar la eficiencia energética de los edificios es fundamental entender no solo los sectores (residencial, oficinas, comercio, etc.) que presentan un mayor potencial para reducir su consumo, sino también los métodos que pueden proporcionar dicha mejora en la eficiencia energética, tanto para los nuevos como para los edificios existentes.

Los perfiles de consumo energético varían sustantivamente en función del tipo de edificio (Howard, et al., 2012), debido a diversos factores como los materiales de construcción utilizados, los perfiles de ocupación o el uso de equipos y de electrodomésticos. Los edificios no residenciales presentan un potencial mayor en cuanto a ahorro energético se refiere. De acuerdo con 'Carbon Trust', en este sector se puede alcanzar una reducción del 70% de las emisiones de carbono incrementando la eficiencia energética de los edificios (UK Green Bulding Council, 2011). Por otro lado, el sector residencial supone alrededor del 60% del consumo energético total de los edificios, por lo que aumentar la eficiencia energética de este sector es fundamental para afrontar los desafíos medioambientales

propuestos (Balaras, et al., 2005). Con el objetivo de proporcionar una guía para optimizar el consumo energético de los edificios, diversos ‘Estándares de Construcción Sostenibles’ han sido desarrollados, estableciendo cánones energéticos que los edificios deben cumplir para reducir su impacto medioambiental. Existen dos caminos para lograr una mejora energética en los edificios: mejorar el diseño exterior e incrementar el rendimiento del sistema térmico interno (Lai, Wang , & Giles, 2014).

Entender y predecir el comportamiento de la demanda energética de los edificios es vital para diseñar planes de desarrollo urbano que aseguren una correcta asignación y diseño de los recursos energéticos, así como una administración adecuada del suministro de energía. Las simulaciones energéticas de edificios a escala urbana son una herramienta útil para obtener información sobre el potencial consumo energético que las ciudades pueden presentar en un futuro. Esta herramienta permite evaluar la posible evolución energética de las ciudades a través del modelado de escenarios que recreen las características futuras de los edificios. Estas simulaciones pueden considerar diferentes niveles de aislamiento de acuerdo con códigos existentes, o con estándares medioambientales, siendo posible realizar una evaluación del ahorro energético que estos códigos o estándares pueden ofrecer.

Los modelos urbanos requeridos para estas simulaciones pueden ser creados a partir de información relacionada con las características físicas de los edificios: geometría, altura, materiales de construcción, orientación, etc. Dicha información puede ser obtenida a partir de ‘Geographic Information Systems’ (mapas GIS), y almacenada en bases de datos PostgreSQL. De esta manera se pueden crear modelos físicos de los edificios para realizar simulaciones energéticas (Perez, 2014) (Vázquez-Canteli & Kampf, 2016). Los datos requeridos para llevar a cabo las simulaciones se obtienen directamente de la base de datos o pueden estimarse a partir de las propiedades geofísicas de los edificios, que también se encuentran almacenadas en la base de datos. Otros datos importantes proporcionan información sobre los habitantes y el equipamiento (iluminación, electrodomésticos, calefacción, etc.) de los edificios (Wate & Coors, 2015). De manera similar, simulaciones energéticas a escala urbana han sido llevadas a cabo en Houston, Texas (misma zona climática que la ciudad de Austin), para determinar el perfil de consumo de los edificios, obteniendo alta resolución en los resultados (Heiple, 2007).

El objetivo de este trabajo es describir la metodología necesaria para crear un modelo físico 3D de los edificios de la ciudad de Austin, y utilizar dicho modelo para llevar a cabo simulaciones energéticas para diferentes tipos de edificios; para analizar el ahorro energético potencial que pueden ofrecer diferentes niveles de reacondicionamiento de acuerdo con estándares LEED, y estudiar el incremento de la demanda energética producido por un aumento de la población en la ciudad.

2 Metodología

En primer lugar, una base de datos con la información de los edificios ha sido creada. Dicha información es necesaria para generar los distintos modelos físicos 3D de los edificios que son utilizados en las simulaciones energéticas. Las características de los modelos reflejan los diferentes escenarios energéticos que se quieren analizar, por lo que cada modelo está asociado a un escenario.

2.1 Creación de la base de datos

La base de datos ha sido creada usando PostgreSQL, un sistema de gestión de bases de datos relacional orientado a objetos, que permite la organización de todos los datos en tablas. La extensión PostGIS proporciona compatibilidad para manejar datos geométricos, incrementando el número de funcionalidades SQL disponibles, necesarias para obtener la máxima información de los mapas GIS.

1.1.1 Estructura de la base de datos

La información necesaria para caracterizar todos los edificios está organizada en diferentes tablas, existiendo una tabla principal (llamada ‘Buildings’) que contiene información importante de cada uno de los edificios, como el número identificador (‘Property ID’), el año de construcción, la altura, el tipo de edificio (residencial, oficinas, comercial, etc.) o la geometría. Los muros de los edificios son definidos como compuestos, cada compuesto está formado por diferentes capas, y cada capa está hecha de un material específico, por lo que cada edificio tiene asociado un tipo de compuesto tanto para sus muros como para su tejado.

Toda la información de la tabla ‘Buildings’ proviene de diferentes fuentes: archivos de texto y mapas GIS proporcionados por el gobierno de la ciudad de Austin u otras tablas que contienen la información de los materiales y capas de los compuestos (propiedades físicas como la densidad, el calor específico o el espesor). La Figura 1 muestra la estructura de la base de datos, pudiéndose observar las diferentes fuentes de información que alimentan la tabla ‘Buildings’. A su vez también existe una tabla con la información de los suelos (parques, carreteras y pavimentos) llamada ‘Grounds’, con la misma estructura que la tabla ‘Buildings’.

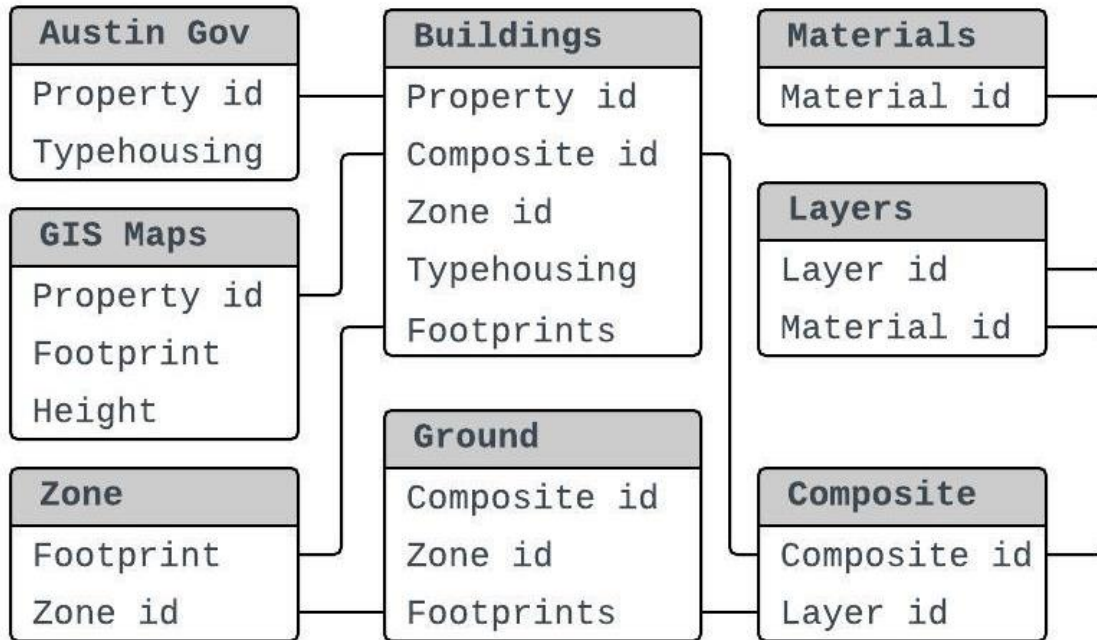


Figura 1: Estructura de la base de datos (diagrama simplificado).

1.1.2 Mapas GIS

Los datos geométricos de edificios, suelos y parcelas fueron obtenidos de mapas GIS, proporcionados por el gobierno de la ciudad, mediante el software QGIS. Esta herramienta permite establecer una conexión directa con la base de datos, permitiendo la importación y exportación de información con los mapas. Existen tres mapas GIS diferentes, cada uno con información clave para crear la base de datos:

- Mapa GIS con las geometrías de los edificios y su altura.
- Mapa GIS con las parcelas de los edificios y su número identificador, ‘Property ID’.
- Mapa GIS con las geometrías de los suelos.

El ‘Property ID’ de cada edificio fue el parámetro utilizado para definir el año de construcción y el tipo de ocupación (esta información fue proporcionada por el gobierno de Austin a través de otros archivos de texto), por lo que el identificador de cada parcela fue asociado a los edificios contenidos en su área. La Figura 2 muestra los mapas GIS de las parcelas (gris) y los edificios (naranja) de Austin, tal como los muestra el software QGIS.

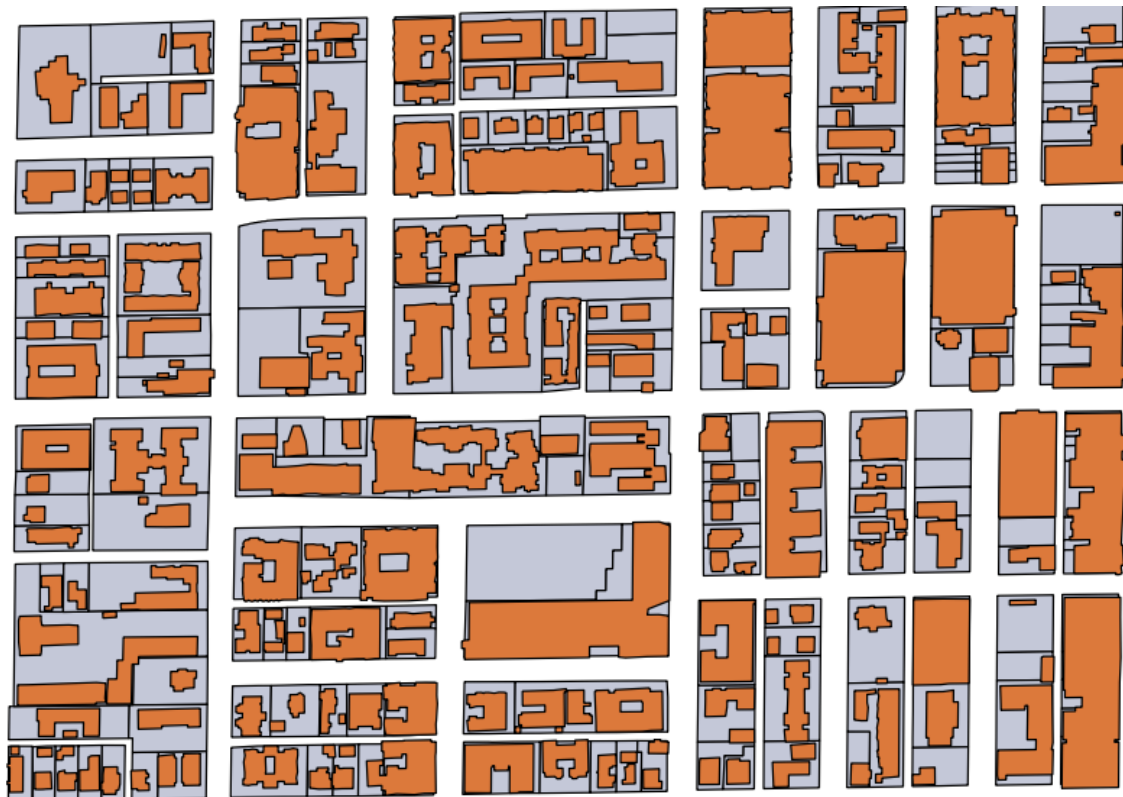


Figura 2: Mapas GIS de las parcelas y los edificios de Austin.

1.1.3 Caracterización de los edificios

Una vez definida la geometría, la altura de cada edificio y el ‘Property ID’ de cada edificio, éste último dato fue utilizado para obtener tanto la edad como el tipo de uso de cada edificio. Esta información es vital para la caracterización de los edificios ya que los compuestos de los muros y de los tejados, las propiedades de las ventanas y los ratios de ventilación han sido estimados a partir de la década de construcción y del tipo de edificio. Ficheros proporcionados por el gobierno de la ciudad contenían información sobre todos los edificios del condado de Travis (donde se encuentra Austin) además de identificar cada uno de los edificios con su ‘Property ID’.

La Tabla 10, la Tabla 11, la Tabla 12 y la Tabla 13 del Anexo I muestran las características y propiedades de todos los materiales almacenados en la base de datos organizados por época, que han sido utilizados para caracterizar los edificios. La Tabla 14 (también en el Anexo I) muestra los tipos de muro utilizados en función del tipo de edificio, así como las

propiedades de las ventanas (obtenidas de un estudio anterior (Perez, 2014)) y de los tejados.

1.1.4 Distrito de West Campus

Este estudio se centra en el distrito de West Campus de la Ciudad de Austin. La mayoría de los edificios de este distrito pertenecen al sector residencial, con 285 viviendas unifamiliares y 228 edificios de apartamentos. Sin embargo, también hay 91 edificios de oficinas y 51 edificios comerciales. En total, el distrito está formado por 655 edificios.

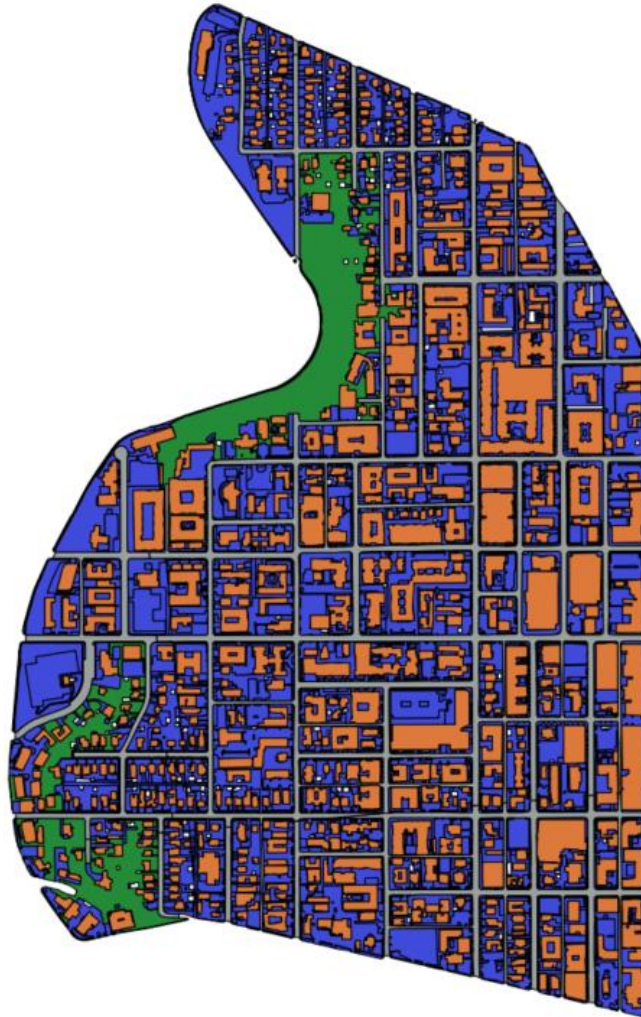


Figura 3: Mapa GIS de las superficies y los edificios de West Campus.

La Figura 3 muestra el mapa GIS del distrito, con los edificios (color naranja) y los suelos (verde para los parques, azul oscuro para el pavimento y gris para las calles). Los edificios con un área igual o menor a 1.39 m^2 (15 ft^2) han sido excluidos de las simulaciones, ya que

estos elementos se corresponden con garajes, almacenes o plazas de parking, por lo que no son de interés y únicamente aumentan la carga computacional de las simulaciones. Para algunos edificios (8% del total), el número de identificación no se encontraba en los archivos proporcionados por el gobierno de la ciudad, por lo que no se podía determinar ni la edad ni el tipo de uso. Mientras que para otro grupo de edificios (4% del total) el dato que faltaba era el año de construcción. Para el primer grupo, el tipo de uso fue determinado en función de la localización, del área y del número de plantas. A continuación, el año de construcción se estimó en función de la edad media de los edificios cercanos del mismo tipo.

2.2 Escenarios LEED para viviendas unifamiliares

‘Leadership in Energy and Environmental Design’ (LEED), es el estándar de construcción sostenible más usado en el mundo. Según este sistema, los edificios reciben una puntuación en función de si cumplen diferentes criterios relacionados con los materiales de construcción, la eficiencia del equipamiento, o el sistema de distribución del agua. Usando este sistema, los edificios residenciales pueden clasificarse en cuatro grupos diferentes, dependiendo de la puntuación final de cada edificio. La Tabla 1 muestra las cuatro categorías y la cantidad de puntos necesaria para lograr el certificado de cada una de ellas.

Tabla 1: Categorías LEED para edificios residenciales (con puntuación).

Categorías	Puntos Requeridos
Certified	40 - 49
Silver	50 - 59
Gold	60 - 79
Platinum	80 - 110

Además, este sistema utiliza otros estándares y códigos energéticos a modo de prerequisites, destacando el código ‘Energy Star Certified Homes Version 3.1’ como el más importante, pues establece estándares para muros, tejados y ventanas como u-values y valores de reflectancia solar.

Cuatro modelos han sido desarrollados para comparar los perfiles de demanda energética de los edificios para diferentes niveles de aislamiento. Para este estudio, un total de 105 viviendas unifamiliares han sido modeladas. El primer modelo representa los edificios en su estado actual, sin haber aplicado ningún tipo de remodelación. Las características de los edificios de este modelo han sido estimadas de acuerdo al año de construcción de cada edificio siguiendo códigos existentes. A partir de este ‘caso base’ se han desarrollado otros tres modelos. El segundo modelo presenta una ligera mejora de las condiciones de los edificios (‘Usual Improvement’), mientras que para el desarrollo del tercer y del cuarto modelo se han aplicado estándares LEED. Las características de los edificios de estos dos últimos modelos se han modificado para recrear edificios con certificados LEED, certificado ‘Silver’ para el tercer modelo y certificado ‘Gold’ para el cuarto.

El objetivo de las simulaciones es analizar la reducción de la demanda térmica, tanto para calefacción como para refrigeración, por lo que los estándares LEED aplicados son aquellos que afectan directamente a los materiales de construcción de muros y techados, a las propiedades de las ventanas y a la ventilación natural de los edificios.

2.2.1 Características de los muros

Para obtener la máxima puntuación LEED para esta sección (6 puntos), la remodelación aplicada debe cubrir lo siguiente:

- Los muros de los edificios deben ser de madera con un u-value máximo de $0.082 \frac{W}{m^2 \cdot K}$.
- La madera utilizada no puede tener un origen tropical y debe incluirse un aislamiento elevado.
- La capa interior del muro debe satisfacer los requisitos de seguridad para reducir la exposición de los ocupantes a contaminantes químicos.

El nuevo compuesto solo se aplica al modelo ‘LEED Gold’, mientras que los otros tres modelos mantienen el compuesto original para sus muros. La Tabla 2 muestra las características de los compuestos para cada uno de los modelos, mostrando las propiedades de los materiales de cada capa.

Tabla 2: Características de los muros para los diferentes modelos.

Escenarios Caso Base, Usual improvement y LEED Silver					
Periodo	Material	Espesor [m]	Conductividad [W/mK]	Cp [J/kgK]	U-value [W/m²K]
Antes 2000	Plywood	0.0127	0.1154	1214	0.5202
	Insulation	0.07	0.0394	800	
	Gyp Board	0.006	0.1677	1089	
Después 2000	Timber Siding	0.13	0.14	523	0.4263
	Glass Wool	0.036	0.036	840	
	Sheathing	0.022	0.022	1885	
	Gyp Board	0.012	0.012	1130	
Escenario LEED Gold					
Periodo	Material	Espesor [m]	Conductividad [W/mK]	Cp [J/kgK]	U-value [W/m²K]
Cualquiera	Larch Timber	0.12	0.12	523	0.0824
	Air Gap	0.13	0.0257	1005	
	Insulation	0.13	0.0288	837	
	Glass Wool	0.04	0.03	840	
	Sheathing	0.022	0.14	1885	
	Gyp Board	0.012	0.1586	1130	

2.2.2 Características de las ventanas

El sistema LEED establece dos categorías para las ventanas, con una puntuación diferente para cada una, dependiendo de su u-value y de su g-value. La información de las ventanas ha sido obtenida del código ASHRAE 90.1-15 (ASHRAE, 2016). La Tabla 3 muestra las propiedades de las ventanas para cada uno de los modelos.

Tabla 3: Características de las ventanas para los diferentes modelos.

Base Case Scenario				
Periodo	U-value [W/m²K]	G-value	Tipo	Puntos
Bef. 2000	4.8	0.45	Single Glazing	0
2000-2009	3.1	0.45		
Después 2010	2	0.48		
Usual Improvement Scenario				
Periodo	U-value [W/m²K]	G-value	Tipo	Puntos
Any	1.3	0.3	Double Glazing	0
LEED Silver Scenario				
Periodo	U-value [W/m²K]	G-value	Tipo	Puntos
Any	0.4	0.1875	Triple Glazing	1.5
LEED Gold Scenario				
Periodo	U-value [W/m²K]	G-value	Tipo	Puntos
Any	0.3	0.1875	Triple Glazing	3

2.2.3 Ventilación natural

La ventilación total de cada edificio ha sido calculada como la suma de la ventilación mecánica requerida y de la ventilación natural (flujo de aire que se infiltra en cada edificio por medios naturales). Los ratios (h^{-1}) tanto para la ventilación mecánica como para la ventilación natural han sido estimados siguiendo el código ASHRAE 62.2 (ASHRAE, 2016).

- La ventilación mecánica depende de las características del área total de la vivienda, del número de plantas, del volumen de la cocina y de la cantidad de dormitorios y baños que posea la vivienda. Todos estos parámetros han sido estimados en función del tamaño de la vivienda.
- Para calcular la ventilación natural de cada vivienda el código ASHRAE 62.2 propone un ratio de infiltración promedio de 0.02 cfm por cada ft^2 que ha sido utilizado para determinar el ratio de infiltración efectivo de cada vivienda.

Además, ASHRAE 62.2 establece un flujo mínimo de ventilación total (natural más mecánica) de 0.35 h^{-1} , que ha sido utilizado como límite inferior para las simulaciones. El sistema LEED establece dos valores máximos para la ventilación natural, mostrados en la Tabla 4, donde también se presenta el flujo de ventilación natural promedio de los edificios con las características originales (utilizadas para el modelo base y el modelo de mejora habitual).

Tabla 4: Valores de la ventilación natural para los diferentes modelos.

Escenarios Base y Usual Improvement	
Infiltration Rate [1/h]	Puntos
AVG = 0.377	0
LEED Silver Scenario	
Infiltration Rate [1/h]	Puntos
0.25	2.5
LEED Gold Scenario	
Infiltration Rate [1/h]	Puntos
0.176	5

2.2.4 Características de los tejados

Esta sección consta de 4 puntos LEED. Para lograrlos los tejados de los edificios deben presentar un aislamiento mayor al que presentan en el caso base y, al menos, una reflectancia solar de 0.28. Esto puede lograrse pintando el tejado de un color que presente un albedo elevado. La Tabla 5 muestra las características de los compuestos de los tejados.

Tabla 5: Características de los tejados para los diferentes modelos.

Escenario Base					
Material	Espesor [m]	Conductividad [W/mK]	Cp [J/kgK]	Solar Reflect.	Puntos
Asphalt Shingle	0.03	0.75	920	0.05	0
Plywood	0.23	0.1154	1214		
Concrete	0.152	0.3	837		
Escenario Usual Improvement					
Material	Espesor [m]	Conductividad [W/mK]	Cp [J/kgK]	Solar Reflect.	Puntos
Asphalt Shingle	0.03	0.75	920	0.15	0
Insulation	0.02	0.028	837		
Plywood	0.23	0.1154	1214		
Concrete	0.152	0.3	837		
Escenarios LEED Silver y LEED Gold					
Material	Espesor [m]	Conductividad [W/mK]	Cp [J/kgK]	Solar Reflect.	Puntos
Asphalt Shingle	0.03	0.75	920	0.3	4
Insulation	0.07	0.028	837		
Plywood	0.23	0.1154	1214		
Concrete	0.152	0.3	837		

2.2.5 Resumen de las puntuaciones

La Tabla 6 recoge un resumen con la puntuación LEED, desglosada por secciones, de cada uno de los modelos.

Tabla 6: Puntuación LEED para cada modelo.

Escenarios				
Sección	Base	Usual Improvement	LEED Silver	LEED Gold
Walls	0	0	0	6
Windows	0	0	1.5	3
Infiltration	0	0	2.5	5
Roof	0	0	4	4
Puntos totales	0	0	8	18

Ambos escenarios LEED ‘Silver’ y ‘Gold’ presentan una puntuación de 8 y 18 puntos respectivamente, una cantidad de puntos considerablemente inferior a la necesaria para lograr dichas certificaciones LEED (Tabla 1). El propósito de las simulaciones es estimar la demanda energética de los edificios para cada uno de los escenarios, por lo tanto, solo se han aplicado las modificaciones LEED que afectan a dicha demanda energética. Sin embargo, la aplicación de estas modificaciones por sí solas no es suficiente para lograr una puntuación que garantice la certificación LEED de los edificios. Como solución, se ha supuesto una base de 45 puntos para ambos escenarios, obteniéndose una puntuación final de 53 puntos para el modelo ‘Silver’ y una puntuación final de 63 puntos para el modelo ‘Gold’.

2.3 Crecimiento de población en edificios multifamiliares

Un modelo de 58 edificios multifamiliares (apartamentos de tres o más alturas) ha sido desarrollado para analizar las consecuencias energéticas producidas por un aumento del número de habitantes en el distrito de West Campus. Los materiales de construcción de los

muros y de los techados han sido determinados siguiendo el código ‘Model Energy Code – 1983 Edition’, mientras que la ventilación natural y las características de las ventanas han sido estimadas siguiendo el código ASHRAE 90.1 (ASHRAE, 2016). Una vez todos los parámetros han sido determinados, son almacenados en la base de datos. La Tabla 7 y la Tabla 8 muestran los parámetros utilizados para caracterizar físicamente los edificios multifamiliares.

Tabla 7: Propiedades los materiales de muros y techados de los edificios multifamiliares.

Material	Espesor [m]	Conductividad [W/mK]	Cp [J/kgK]	Solar Reflect.
4'' Lightweight Concrete	0.1016	0.3	837	0.4
Insulation	0.0762	0.0394	800	
Gyp Board	0.0064	0.1677	1089	

Tabla 8: Propiedades de las ventanas de los edificios multifamiliares.

Material	Espesor [m]	Conductividad [W/mK]	Cp [J/kgK]	Solar Reflect.
4'' Lightweight Concrete	0.1016	0.3	837	0.4
Insulation	0.0762	0.0394	800	
Gyp Board	0.0064	0.1677	1089	

El número de ocupantes de los edificios ha sido estimado en función del área, del número de alturas y de la densidad de ocupación proporcionada por el código ASHRAE 90.1 (ASHRAE, 2016). El número de plantas ha sido calculado a partir de la altura de cada edificio, mientras que para determinar el número de apartamentos de cada edificio se ha asumido una vivienda por cada cuatro ocupantes. A partir del número de viviendas de cada

edificio se han definido los perfiles de probabilidad de uso tanto para la iluminación como para el equipamiento de cada edificio.

Un primer modelo fue desarrollado manteniendo la altura original de los edificios, a partir del cual se han creado numerosos modelos aumentando la altura (y por tanto el número de plantas) de cada edificio progresivamente. De esta manera es posible simular la evolución del consumo energético de los edificios representando un aumento de la población que conlleva la construcción de edificios de mayor altura (crecimiento vertical del distrito). La Figura 4 muestra el modelo 3D de un edificio antes y después de aumentar el número de plantas del mismo, aumentando a su vez el número de ocupantes.

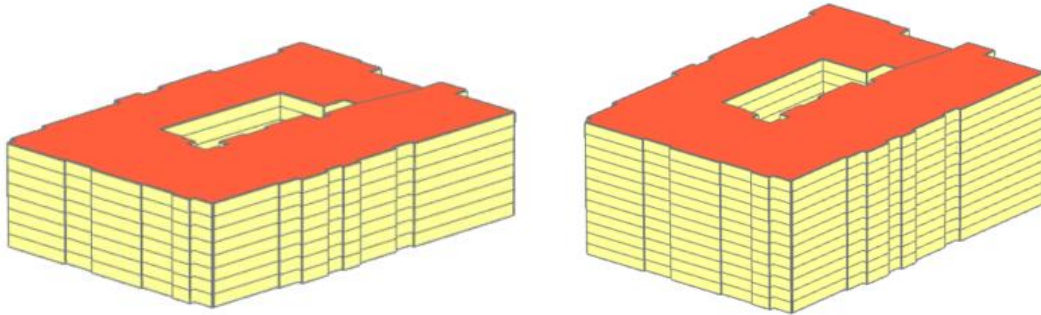


Figura 4: Modelo 3D de un edificio tras aumentar el número de alturas.

2.4 Modelo geométrico 3D con datos físicos de los edificios

Las simulaciones se llevaron a cabo utilizando el software CitySim Pro, un simulador energético de edificios validado para análisis a escala urbana, y desarrollado en la Ecole polytechnique fédérale de Lausanne (EPFL). Este programa lee un archivo XML con la información geométrica y física necesaria para caracterizar cada uno de los edificios y así generar el modelo 3D de los edificios. Este modelo es utilizado para realizar las simulaciones, junto con otro archivo que contiene los datos climáticos de la ciudad por hora.

Los resultados son exportados como un archivo de texto y están organizados por planta y edificio (utilizando el número de identificación de cada edificio) para cada hora durante un año (un total de 8760 horas). La Figura 5 muestra el modelo 3D y físico de un grupo de edificios del distrito de West Campus antes y después de realizar las simulaciones energéticas.

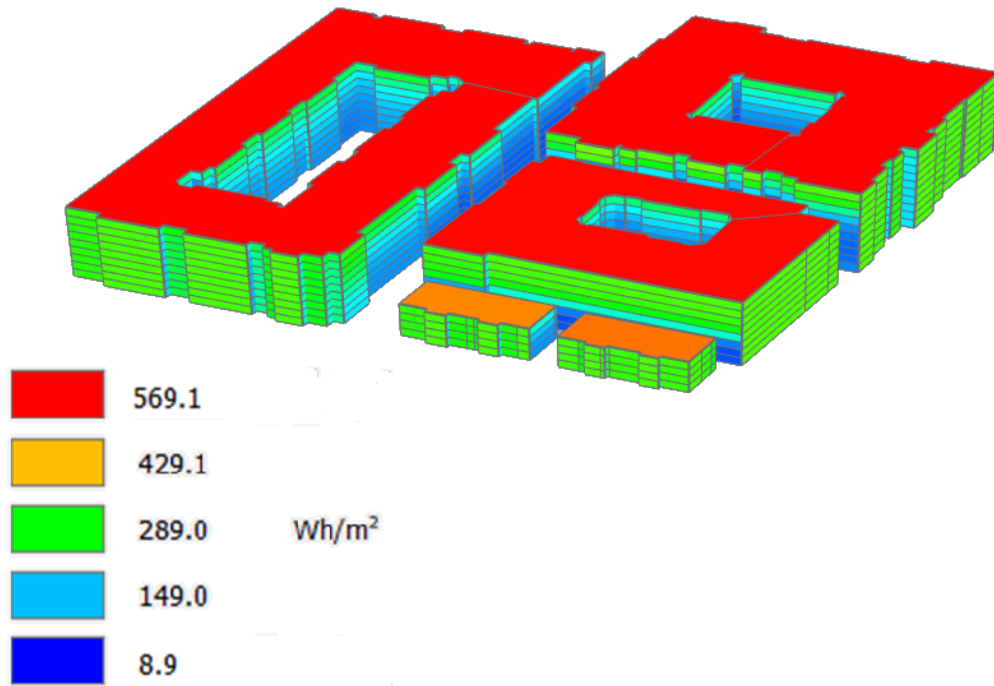
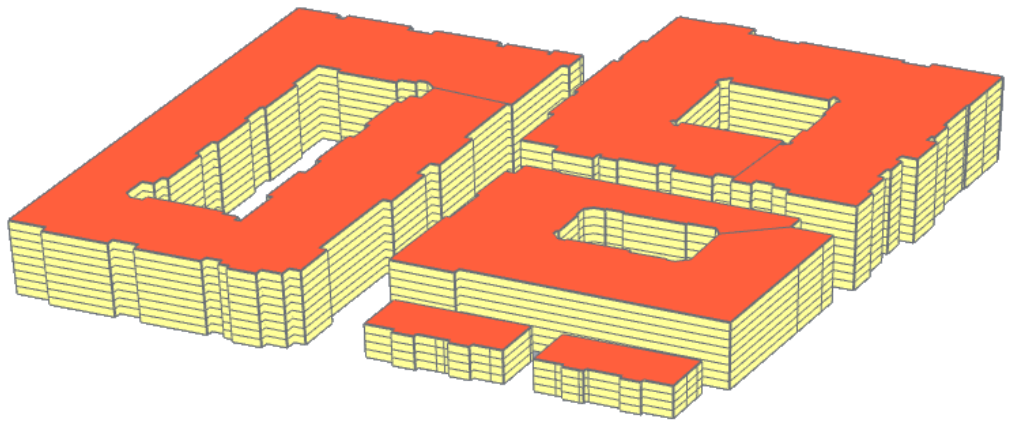


Figura 5: Modelo 3D de un grupo de edificios del distrito de West Campus antes y después de realizar las simulaciones.

El archivo XML requerido por el software de simulación se genera a partir de un programa Java que obtiene la información de cada edificio de la base de datos. Este programa Java ya estaba desarrollado (Vázquez-Canteli & Kampf, 2016), aunque se le aplicaron las modificaciones necesarias para adatarlo a la base de datos de los edificios de Austin. Además, el programa Java permite modelar los edificios como una única zona térmica, es decir, sin tener en cuenta las diferentes plantas del edificio. De esta manera se reduce considerablemente la carga computacional necesaria para llevar a cabo las simulaciones, permitiendo simular un mayor número de edificios. La Figura 6 muestra los modelos de un grupo de edificios, con y sin pisos.

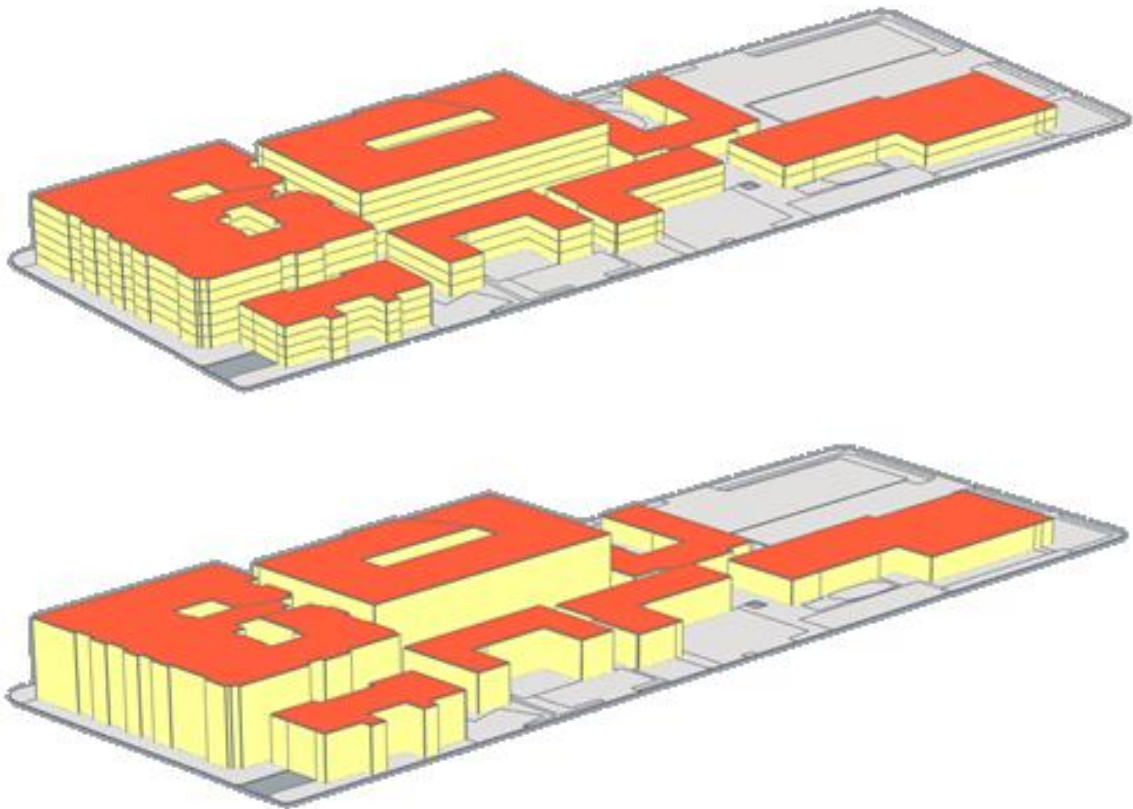


Figura 6: Modelo de edificios con y sin pisos.

Sin embargo, al sustituir las capas de material que separan las diferentes plantas por una columna de aire, la inercia térmica de los edificios varía, pudiendo reducir la precisión de las simulaciones con respecto al modelo original (más detallado) considerablemente. La Figura 7 muestra la demanda térmica para refrigeración y para calefacción de un grupo de edificios, comparando el modelo original con pisos y otro menos detallado sin pisos. En

este caso no se han simulado los ocupantes, pues se quiere observar el comportamiento térmico de los edificios sin que este se vea afectado por la actividad estocástica de los habitantes.

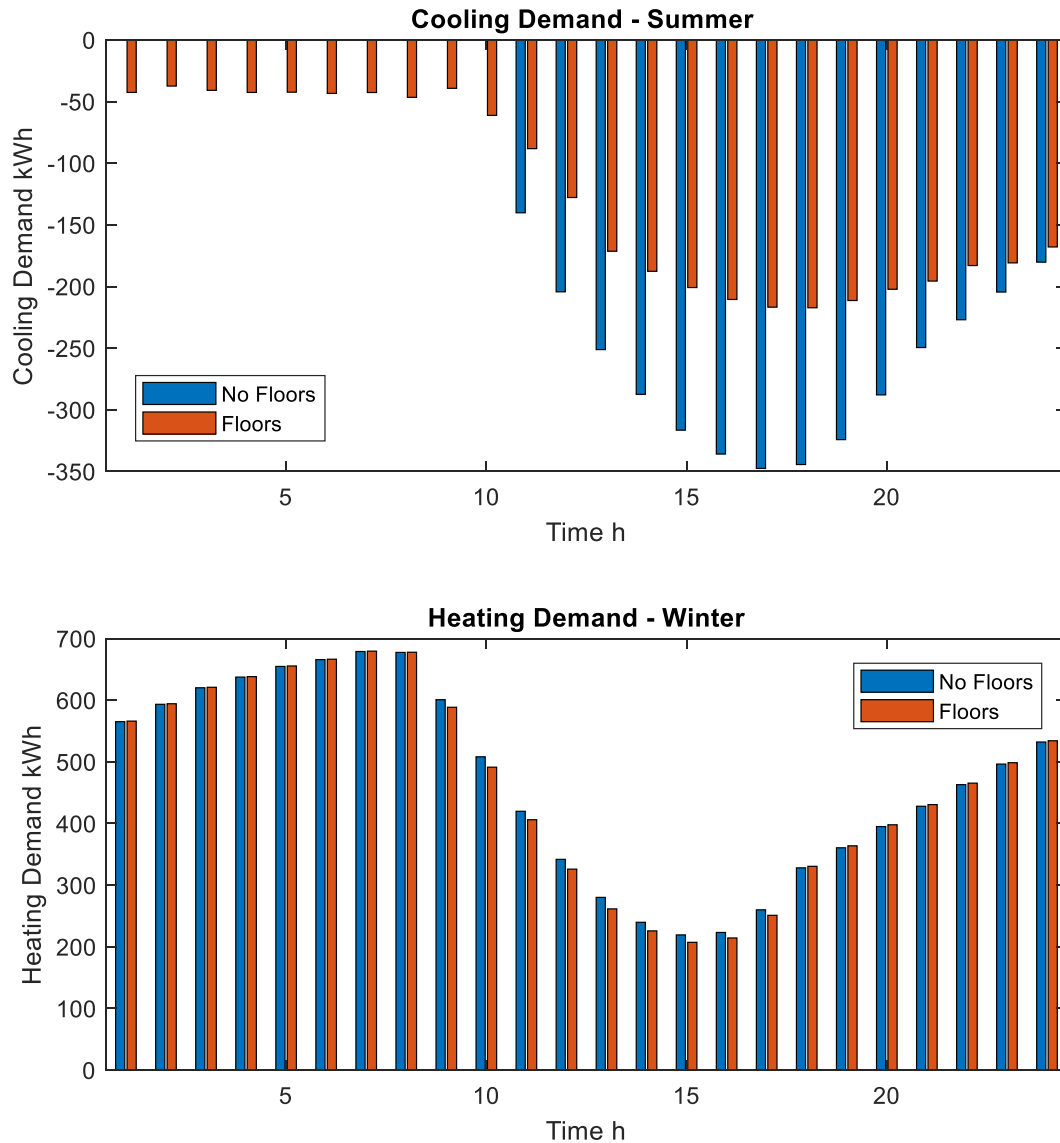


Figura 7: Demanda térmica de refrigeración y de calefacción de los modelos con y sin pisos.

Como se puede observar, el modelo menos detallado ofrece una precisión aceptable (diferencia menor al 10%) prediciendo la demanda térmica de calefacción, por lo que podría utilizarse para simular las estaciones más frías del año. En cambio, se puede apreciar una diferencia notable (entre un 40% y un 50%) entre los resultados ofrecidos por ambos modelos cuando se estima la demanda térmica de refrigeración. Teniendo en cuenta que la

ciudad de Austin se encuentra en una zona térmica calurosa, la precisión que ofrecería el modelo sin pisos durante la mayor parte del año no sería aceptable. Por lo tanto, para las simulaciones se ha utilizado el modelo más detallado.

3 Resultados y Discusión

Para las simulaciones de ambos ensayos la temperatura interior de confort mínima y máxima se ha establecido en 21.0°C y 24.0°C respectivamente. Bombas de calor alimentadas por aire han sido utilizadas como fuentes tanto de calor como de frío, estableciendo una eficiencia técnica de 28% en el software de simulación para el equipo, con una temperatura objetivo de 55.0°C para calefacción y de 5.0°C para refrigeración.

3.1 Simulaciones LEED

Los resultados de las simulaciones de viviendas unifamiliares bajo estándares LEED muestran la demanda energética para calefacción y refrigeración por estación: invierno (diciembre, enero y febrero), primavera (marzo, abril y mayo), verano (junio, julio y agosto) y otoño (septiembre, octubre y noviembre). Los resultados presentan la demanda térmica promedio de un día en escala horaria para cada estación. Todos los valores han sido normalizados utilizando el valor de demanda máximo, que obviamente se da en las simulaciones del caso base, por lo que los resultados se muestran escalados de 0 a 1. Consecuentemente, se puede observar tanto la variación en la demanda entre los diferentes edificios (causada por diferencias arquitectónicas), como el perfil de la demanda energética y la reducción de la misma producida por la mejora de los edificios.

La Figura 9 y la Figura 9 muestran una comparación entre las demandas térmicas de calefacción para cada uno de los cuatro escenarios durante el otoño, mientras que la Figura 10 y la Figura 11 muestran dicha demanda para el invierno.

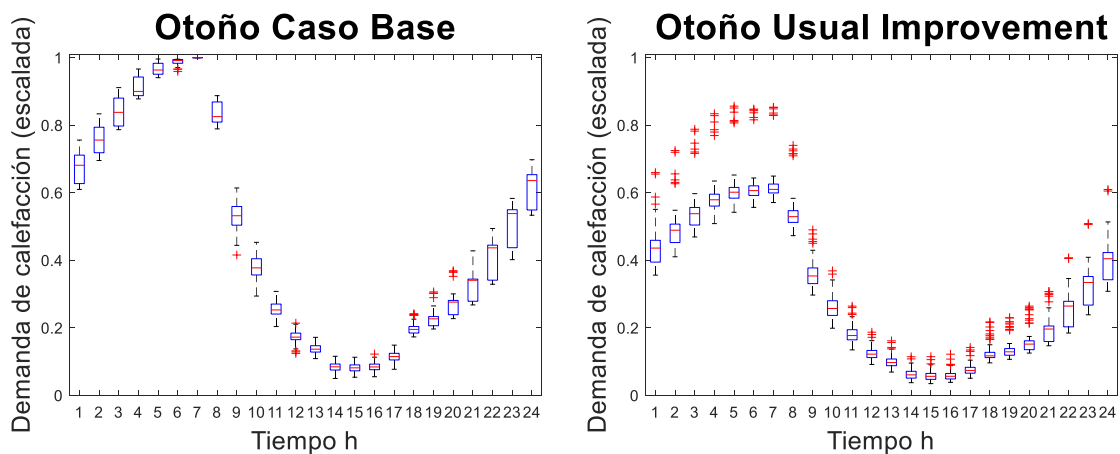


Figura 8: Demanda térmica para calefacción de otoño para viviendas unifamiliares (1).

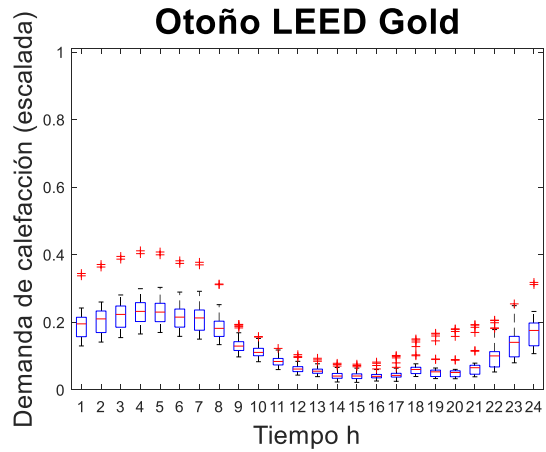
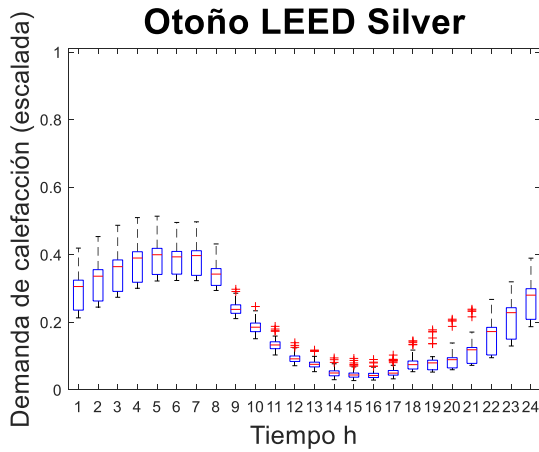


Figura 9: Demanda térmica para calefacción de otoño para viviendas unifamiliares (2).

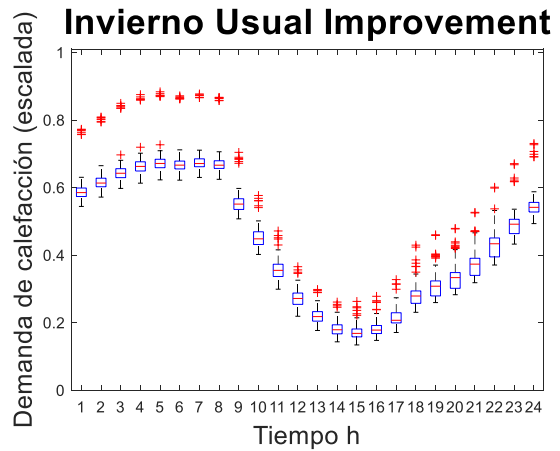
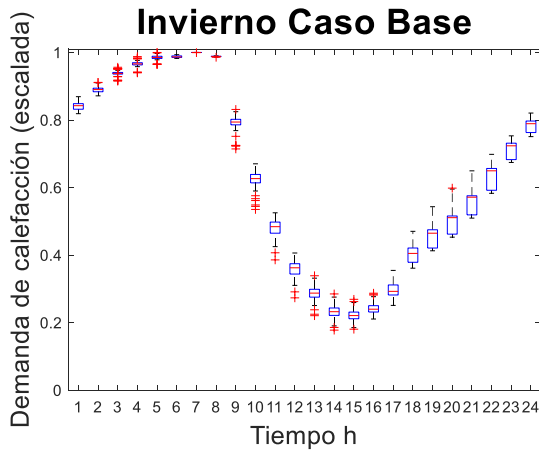


Figura 10: Demanda térmica para calefacción de invierno para viviendas unifamiliares (1).

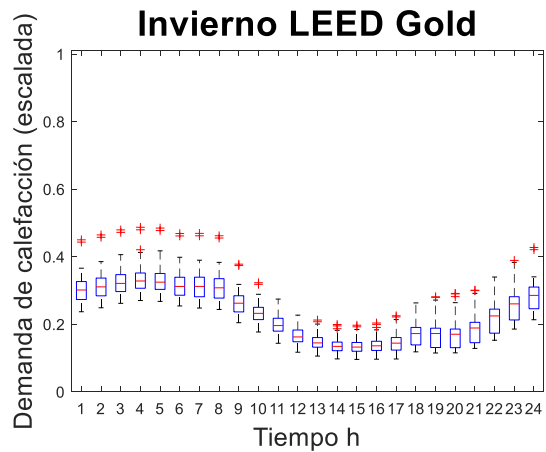
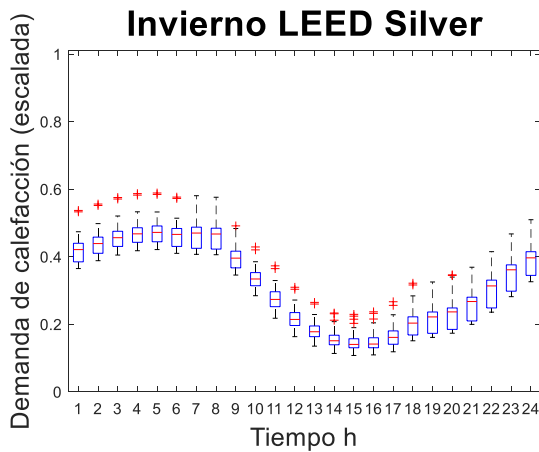


Figura 11: Demanda térmica para calefacción de invierno para viviendas unifamiliares (2).

La reforma de los edificios ofrece una reducción de la demanda térmica de calefacción de aproximadamente un 60%. Esta mejora es especialmente significativa durante las horas nocturnas, debido a que en ese tramo del día la diferencia entre las temperaturas interior y exterior es máxima, potenciando el ahorro energético. Durante las primeras horas de la mañana la demanda de calefacción se reduce drásticamente debido al incremento de la temperatura exterior, unido a la actividad de los habitantes, que produce un aumento de las ganancias caloríficas internas. Este fenómeno es más pronunciado en el caso base, pues la inercia térmica de los edificios de este modelo es menor. Al aumentar el nivel de aislamiento de los edificios se aumenta su inercia térmica, reduciendo la sensibilidad de estos a las fluctuaciones de la temperatura exterior, siendo especialmente notable en los modelos de los edificios con certificaciones LEED.

La demanda térmica de refrigeración durante el verano para los distintos escenarios se puede observar en la Figura 14. El ahorro energético para refrigeración que las mejoras pueden ofrecer se encuentra entre el 40% y el 45% durante las horas más calurosas del día, es decir, cuando la demanda de refrigeración es máxima. Durante las últimas horas de la noche, cuando la diferencia entre las temperaturas externa e interna es mínima, la remodelación de los edificios no se traduce en una reducción de la demanda de refrigeración, e incluso durante las primeras horas de la mañana algunos edificios presentan una demanda igual o superior en los escenarios LEED, comparando con el caso base. Esto puede estar causado por la actividad estocástica de los ocupantes, que tiene un mayor impacto en la demanda energética cuando la diferencia de temperatura con el exterior es mínima, independientemente de las remodelaciones y mejoras aplicadas.

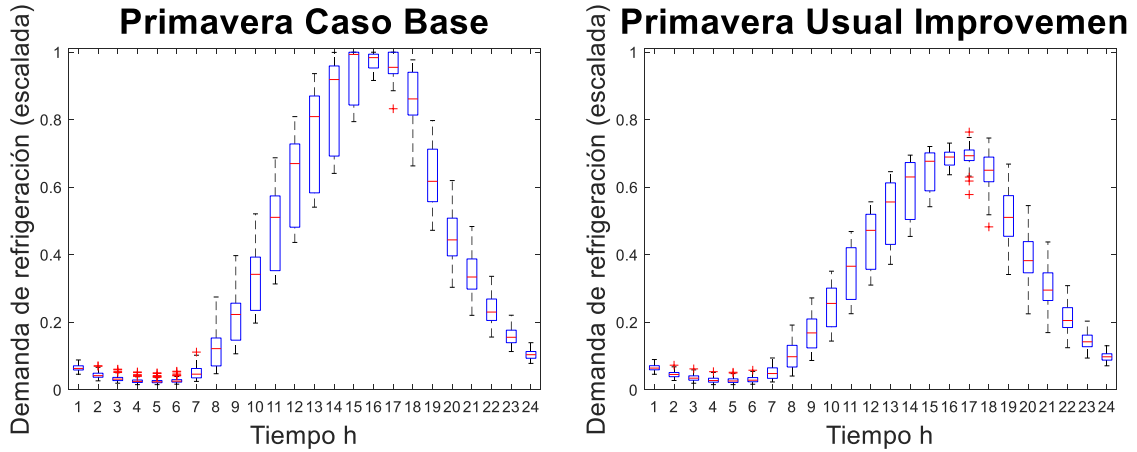


Figura 12: Demanda térmica para refrigeración de primavera para viviendas unifamiliares (1).

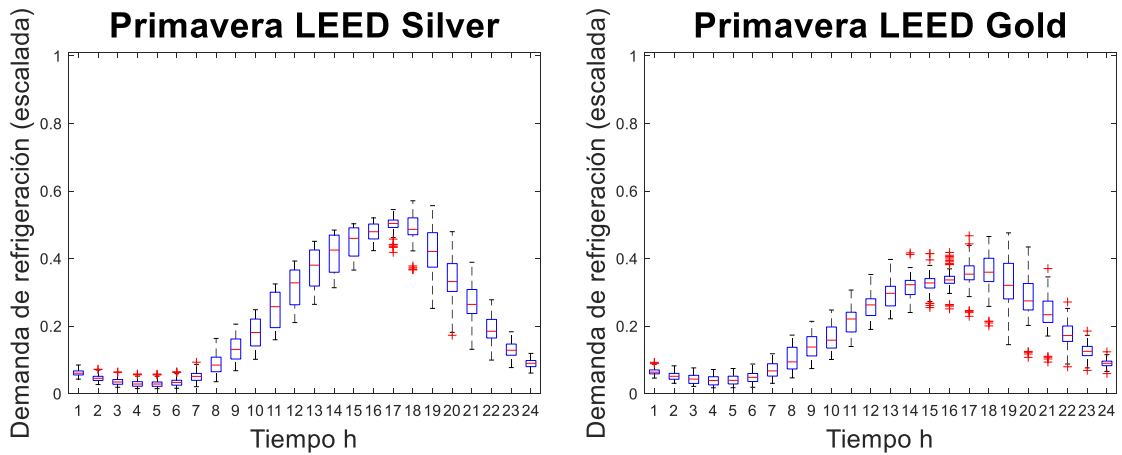


Figura 13: Demanda térmica para refrigeración de primavera para viviendas unifamiliares (2).

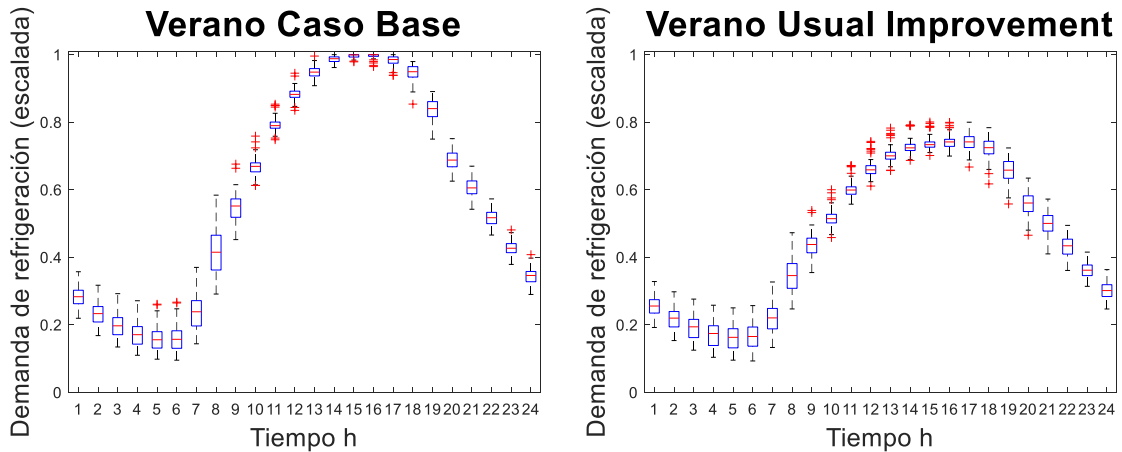


Figura 14: Demanda térmica para refrigeración de verano para viviendas unifamiliares (1).

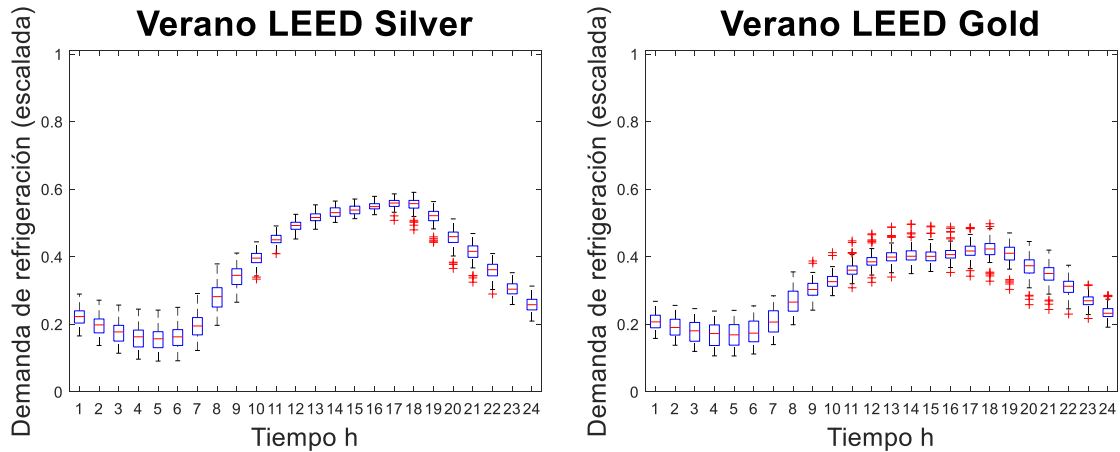


Figura 15: Demanda térmica para refrigeración de verano para viviendas unifamiliares (2).

Como también se observa en la Figura 12, la Figura 13, la Figura 14 y la Figura 15, la inercia térmica de los edificios aumenta tras aplicar las mejoras representadas en los distintos modelos. Sin embargo, comparando las estaciones de invierno y de verano se puede observar que durante el verano la demanda de refrigeración presenta fluctuaciones ligeramente más pronunciadas que la demanda de calefacción durante el invierno, mostrando una mayor sensibilidad de la demanda térmica a los cambios en la temperatura exterior cuando se trata de refrigeración. Un análisis de regresión es útil no sólo para mostrar la relación que existe entre la diferencia de temperatura con el exterior (regresor), sino también para cuantificar la fuerza de dicha relación a través de un estudio del factor R^2 ajustado.

La Figura 17 y la Figura 17 muestran la distribución del factor R^2 ajustado para la demanda térmica de calefacción y de refrigeración, utilizando la diferencia de temperatura con el exterior como regresor. La diferencia de temperatura funciona como un mejor regresor de la demanda térmica cuando no se ha aplicado ninguna remodelación a los edificios, obteniéndose los valores de R^2 más altos en el escenario base, y los más bajos en el escenario 'LEED Gold'. La principal consecuencia que presenta el aumento de la inercia térmica es la reducción de la sensibilidad de la demanda energética a las variaciones de la temperatura exterior. El valor medio del factor R^2 ajustado de los 105 edificios para refrigeración se reduce de 0.946 (caso base) a 0.906 ('LEED Gold'), mientras que para calefacción pasa de 0.955 (caso base) a 0.916 ('LEED Gold'). Por lo tanto, un modelo de regresión que utiliza la diferencia de temperatura con el exterior como regresor puede ser

útil para predecir la demanda energética, a pesar de las actividades estocásticas de los ocupantes.

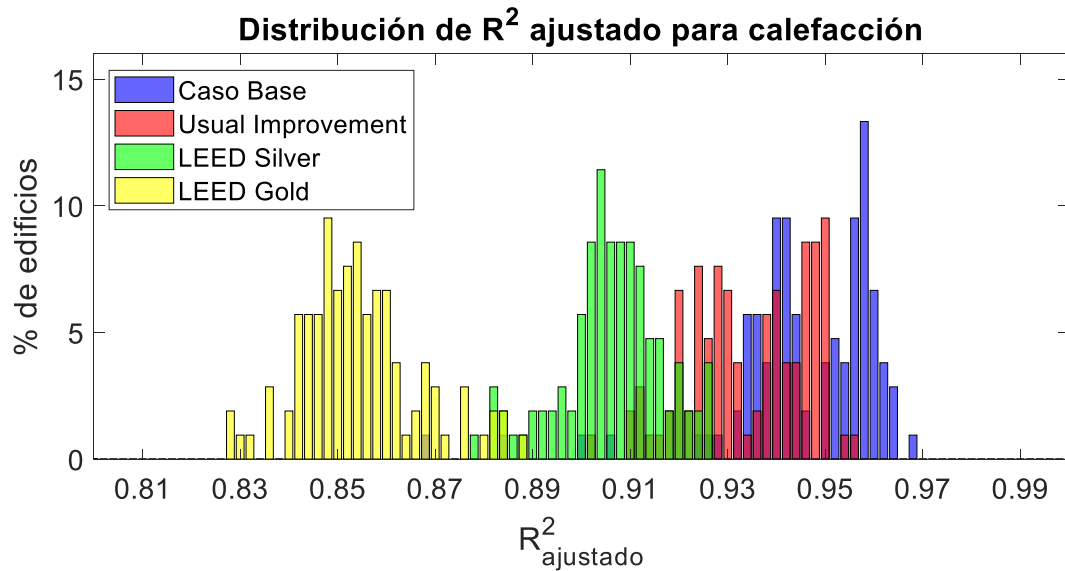


Figura 16: Distribución del factor R^2 ajustado para la demanda térmica de refrigeración utilizando ΔT como regresor.

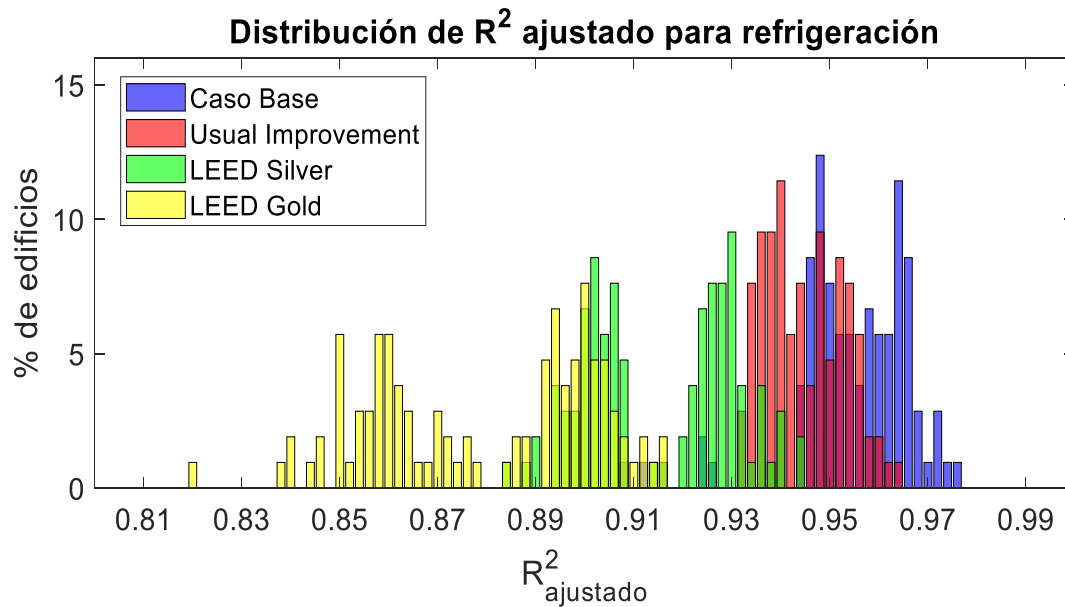


Figura 17: Distribución del factor R^2 ajustado para la demanda térmica de refrigeración utilizando ΔT como regresor.

3.2 Análisis del crecimiento de la población

La Figura 18 y la Figura 19 presentan la evolución de la demanda térmica de calefacción y de refrigeración por estación del distrito de edificios multifamiliares, mostrando una relación lineal entre estos factores y el crecimiento del número de ocupantes del distrito. Sin embargo, el mismo porcentaje de crecimiento en el número de habitantes se traduce en diferentes porcentajes de crecimiento para las demandas de calefacción y de refrigeración en función de la estación.

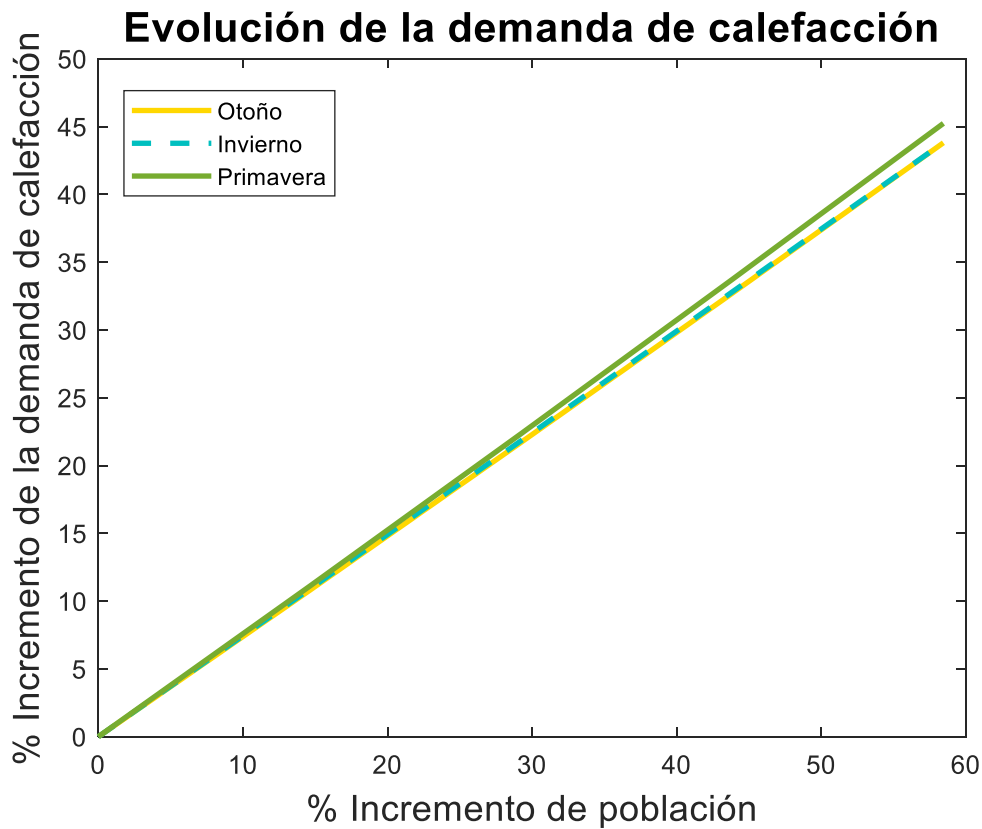


Figura 18: Evolución de la demanda de calefacción vs Crecimiento de la población en % por estación.

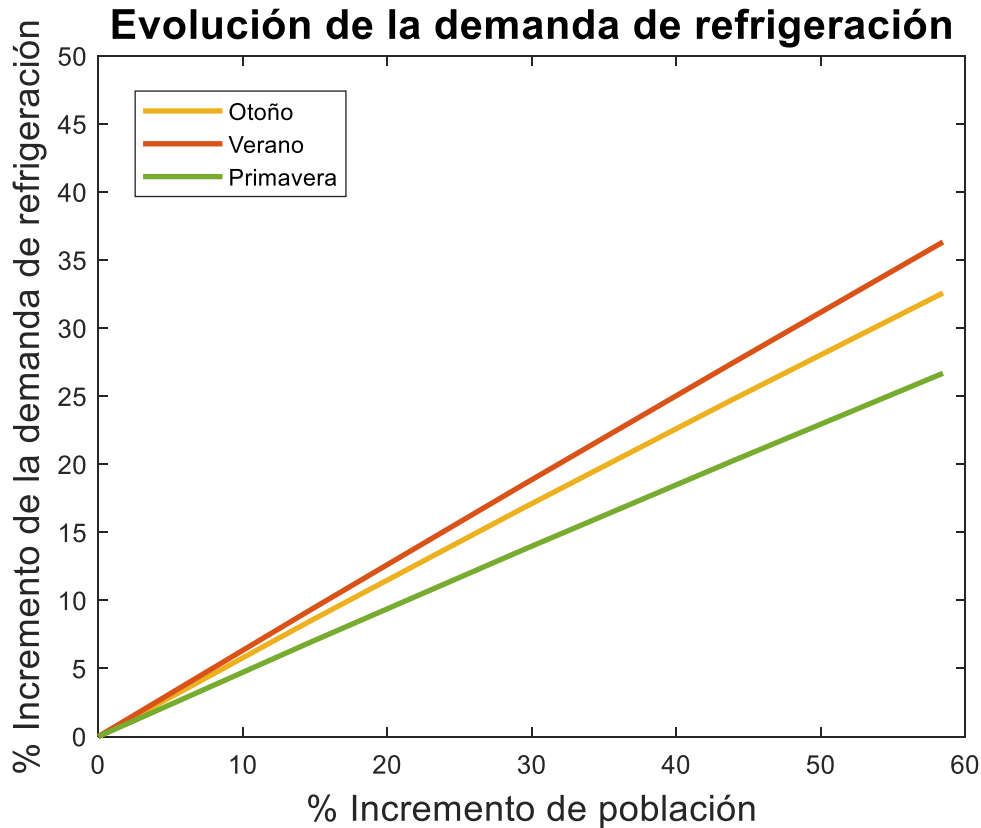


Figura 19: Evolución de la demanda de refrigeración vs Crecimiento de la población en % por estación.

Se puede observar una diferencia significativa entre las pendientes de las curvas de la evolución de las demandas de calefacción y de refrigeración. Cuando se trata de demanda de calefacción, la pendiente de las curvas es prácticamente idéntica para todas las estaciones, a diferencia de la demanda de refrigeración, cuyas curvas presentan pendientes significativamente diferentes en función de la estación del año. Se puede observar que, bajo las condiciones climáticas de la Ciudad de Austin, no hay demanda de calefacción durante el verano ni demanda de refrigeración durante el invierno. El aumento de la población del distrito produce un mayor incremento de la demanda de refrigeración durante el verano, presentando el menor incremento durante la primavera. Además, las pendientes de todas las curvas de demanda de calefacción son mayores que las de las curvas de demanda de refrigeración. Este fenómeno podría deberse a los cambios en las ganancias solares de los edificios del distrito. El aumento de la altura de un edificio implica un incremento directo de su demanda energética, pero al mismo tiempo, también produce un efecto de sombra en

los edificios cercanos, reduciendo las ganancias solares de dichos edificios. Las condiciones climáticas de Austin potencian el impacto de estas interacciones entre los edificios, produciendo una diferencia significativa en la evolución de la demanda de refrigeración para cada una de las tres estaciones.

En la planificación del desarrollo urbano de la ciudad, no solo se debe tener en cuenta el consumo energético de los nuevos edificios, sino también es importante considerar el impacto que estas nuevas construcciones tienen en los edificios existentes. La Figura 20 muestra la evolución de la demanda de refrigeración para un edificio, comparando dos modelos diferentes. En el modelo 1 (línea continua) los edificios de alrededor han sido simulados, mientras que en el modelo 2 (línea discontinua) solo se ha simulado el propio edificio, es decir, no se ha tenido en cuenta la sombra producida por los edificios de alrededor.

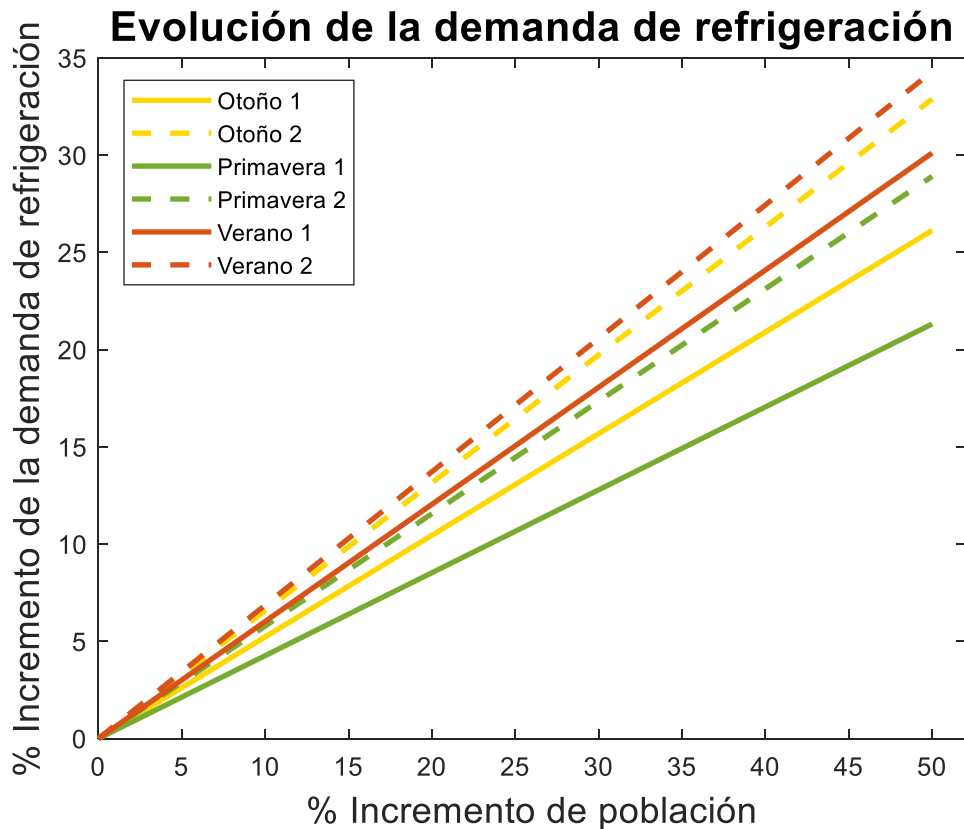


Figura 20: Evolución de la demanda de refrigeración vs Crecimiento de la población de un edificio por estación, con y sin edificios alrededor.

Cuando se omite la sombra que producen los edificios de alrededor (modelo 2), las pendientes de las curvas de demanda de refrigeración son más similares entre estaciones que cuando dicho efecto es considerado. Cuando los edificios de alrededor son simulados la evolución de la demanda del edificio es similar a la del distrito, mostrada en la Figura 19. Sin embargo, todavía existe una diferencia entre las estaciones. Incluso si los edificios cercanos no son simulados, las características geométricas y arquitectónicas del propio edificio (patio interior, altura, perímetro, etc.) producen sombra sobre el propio edificio, lo que también afecta la evolución de la demanda energética. La Figura 21 muestra la evolución de la demanda térmica de calefacción para el mismo edificio comparando ambos modelos.

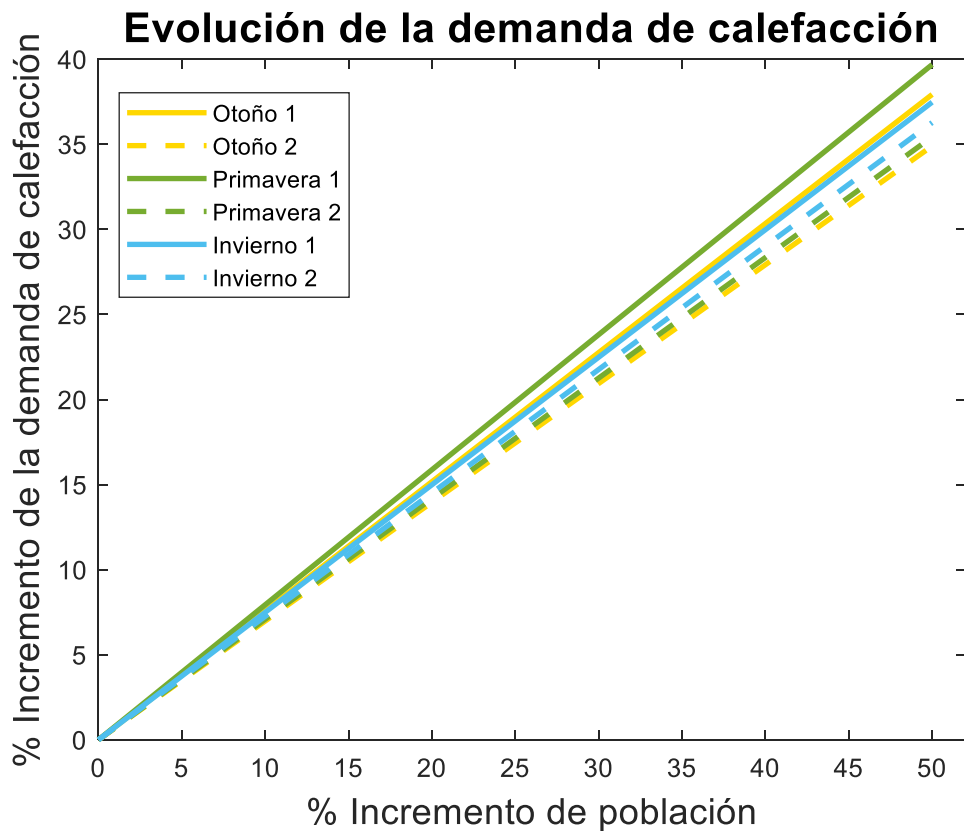


Figura 21: Evolución de la demanda de calefacción vs Crecimiento de la población de un edificio por estación, con y sin edificios alrededor.

De nuevo, las curvas del modelo 2 son más similares que las del modelo 1. Sin embargo, la demanda de calefacción es menos sensible a las interacciones entre los edificios que la demanda de refrigeración.

La Tabla 9: Diferencia en el incremento de la demanda térmica entre el modelo 1 y el modelo 2 $(Q_1-Q_2)/Q_1$ Tabla 9 presenta la diferencia promedio en el incremento de la demanda para calefacción y para refrigeración entre los modelos para una muestra de cinco edificios del distrito, antes y después de aumentar la ocupación de los mismos un 50%. Se puede observar que la demanda de refrigeración es más sensible a la sombra producida por los edificios cercanos. Además, durante las estaciones de primavera y de otoño la diferencia es mayor que durante las estaciones de verano y de invierno, cuando las temperaturas son más extremas. En zonas climáticas calurosas como la de Austin, donde las temperaturas son muy elevadas y hay una gran cantidad de horas de luz solar a lo largo del año, estas interacciones entre los edificios son un factor importante a tener en cuenta en la planificación urbana de la ciudad, ya que pueden servir para mejorar la eficiencia energética de los edificios, tanto los nuevos como los existentes.

Tabla 9: Diferencia en el incremento de la demanda térmica entre el modelo 1 y el modelo 2 $(Q_1-Q_2)/Q_1$

Season		Occupancy Growth	
		0%	50%
Heating Demand	Fall	-6.69%	-9.91%
	Spring	-7.75%	-11.87%
	Winter	-2.83%	-4.12%
Cooling Demand	Fall	15.52%	26.56%
	Spring	16.21%	27.85%
	Summer	7.96%	13.96%

Finalmente, la Figura 22 muestra la evolución de la demanda eléctrica del distrito.

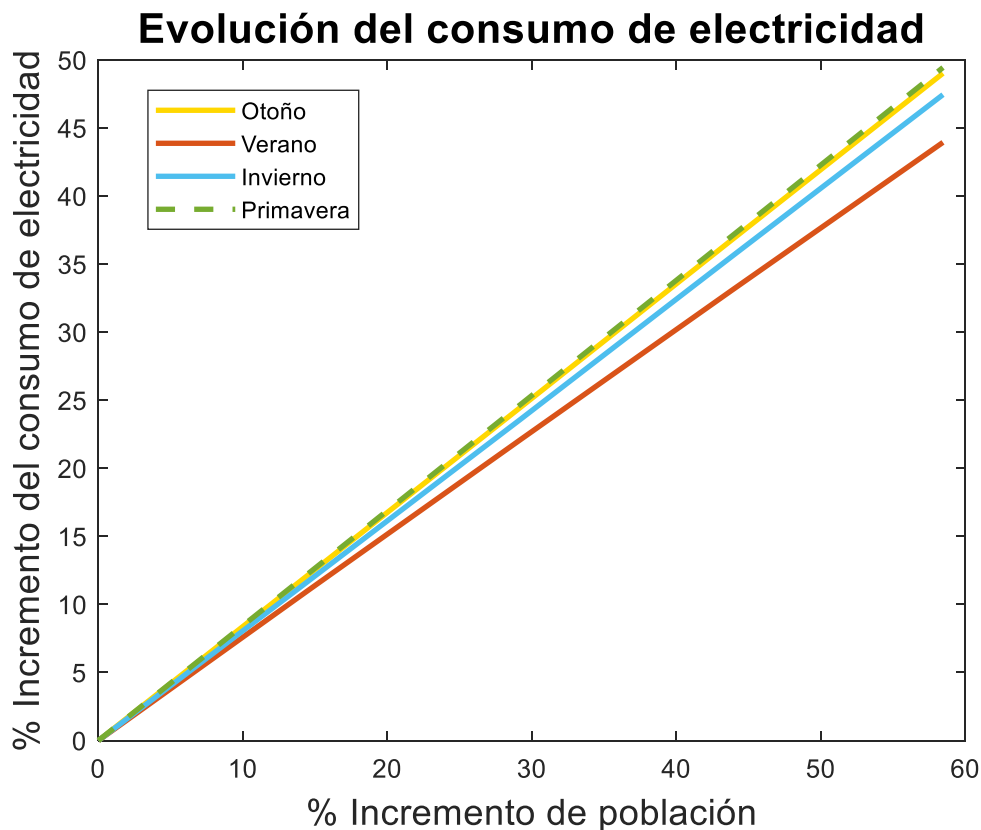


Figura 22: Evolución de la demanda eléctrica vs Crecimiento de la población en % por estación.

La construcción de edificios de mayor altura proporciona una mejora significativa de la eficiencia energética de los edificios. Un aumento de población del 60% se traduce en un aumento del consumo eléctrico entre el 40% y el 50%. Considerando el consumo energético por ocupante, se consigue un incremento en la eficiencia energética de casi un 20%. Durante las estaciones de otoño, primavera e invierno, el consumo eléctrico la evolución de la demanda eléctrica es similar a la evolución de la demanda térmica de calefacción. Las curvas de la demanda de refrigeración presentan una pendiente menor, por lo tanto, tienen un impacto menor en el consumo eléctrico. Durante el verano, la pendiente de la curva de la demanda eléctrica es mayor que la de la demanda de refrigeración. Los sistemas de climatización presentan un COP inferior para refrigeración que para calefacción, por lo que el incremento del consumo eléctrico durante las estaciones más calurosas es mayor que el incremento de la demanda de refrigeración.

4 Conclusión

Las simulaciones energéticas de edificios una herramienta muy útil a la hora de predecir la demanda térmica y eléctrica a escala urbana. El desarrollo de modelos 3D permite la consideración de factores geométricos y arquitectónicos, lo que significa una ventaja importante en la planificación del crecimiento urbano de las ciudades. El potencial de las simulaciones energéticas de edificios reside no solo en predecir la demanda energética actual, sino en la posibilidad de construir escenarios que representen los diferentes futuros energéticos a los que la ciudad y sus edificios pueden hacer frente. Estos escenarios pueden representar situaciones como las variaciones del cambio climático, el aumento exponencial de los habitantes en una zona específica de la ciudad, la construcción de nuevos edificios más modernos y de mayor altura o, incluso, la combinación de varios de estos factores. El sector residencial es adecuado para llevar a cabo este tipo de simulaciones ya que el modelado de los perfiles de ocupación y uso de electrodomésticos, así como la caracterización del equipamiento y la potencia instalado son más sencillos que en otros sectores.

La aplicación de estándares LEED a edificios unifamiliares ya existentes reduce drásticamente el consumo energético de los edificios. Este ahorro se consigue mejorando las ventanas, los tejados, los muros y los ratios de ventilación natural. Sin embargo, durante las épocas del año donde la diferencia de temperatura entre el exterior y el interior de las viviendas no es excesivamente elevada, el impacto de estas modificaciones se ve severamente reducido debido a la influencia que la actividad de los ocupantes (independiente de cualquier reforma que se realice a los edificios) tiene en la demanda energética final, ya que posee un peso similar al que tiene la demanda térmica. Por lo tanto, las condiciones climáticas son un factor clave a la hora de valorar la implementación de medidas LEED, siendo Austin una ciudad apropiada para la implantación de dichos estándares pues posee unas condiciones climáticas con temperaturas extremas (especialmente calurosas durante un tercio del año) y muchas horas donde la radiación solar incide directamente sobre los edificios.

Por otro lado, el crecimiento vertical de la ciudad, producido por la construcción de nuevos edificios con una mayor altura, permite la concentración de un mayor número de habitantes

dentro del área urbana de la ciudad, a la vez que mejora la eficiencia energética de la ciudad. Incluso si las nuevas construcciones mantienen las características actuales de los edificios, el consumo energético por habitante se vería reducido debido a que las superficies de los edificios (y con ello las pérdidas térmicas) aumentan en una proporción menor a la que lo hace el número de habitantes. Además, en zonas climáticas calurosas, los efectos de las interacciones que se producen entre edificios cercanos pueden ser explotados para reducir la demanda de refrigeración, aumentando el ahorro energético potencial.

Referencias

- ASHRAE. (2016). *ASHRAE Standard 62.2-2016 - Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality*.
- ASHRAE. (2016). *ASHRAE Standard 90.1-2016 - Energy Standard for Buildings Except Low-Rise Residential Buildings*.
- Balaras, C., Gaglia, A., Georgopoulou, E., Mirasgedis, S., Sarafidis, Y., & Lalas, D. (2005). *European Residential Buildings and Empirical Assessment of the Hellenic Building Stock, Energy Consumption, Emissions and Potential Energy Savings*.
- City of Boston. (2014). *Greenovate Boston 2014 Climate Action Plan Update*.
- Hani, A., & Koiv, T.-A. (2012). *Energy Consumption Monitoring Analysis for Residential Educational and Public Buildings*. Tallinn University of Technology.
- Heiple, S. (2007). *Using Building Energy Simulation and Geospatial Modeling Techniques in Determine High Resolution Building Sector Energy Consumption Profiles*.
- Howard, B., Parshall, L., Thompson, J., Hammer, S., Dickinson, J., & Modi, V. (2012). *Spatial Distribution of Urban Building Energy Consumption by End Use*.
- Lai, K., Wang, W., & Giles, H. (2014). *Performance Analysis of an Energy Efficient Building Prototype by Using TRNSYS*.
- Perez, D. (2014). *A Framework to Model and Simulate the Disaggregated Energy Flows Supplying Buildings in Urban Areas*.
- Pérez-Lombard, L., Ortiz, J., & Pout, C. (2008). *A Review on Buildings Energy Consumption Information, Vol. 40, No. 3, pp. 394-398*.
- UK Green Building Council. (2011). *Carbon Reductions in Existing Non-Domestic Buildings*.
- United Nations. (2014). *World Urbanization Prospects, the 2014 Revision*. United Nations, Department of Economic and Social Affairs.

Vázquez-Canteli, J., & Kampf, J. (2016). *Massive 3D Models and Physical Data for Building Simulation at the Urban Scale: a Focus on Geneva and Climate Change Scenarios*.

Wate, P., & Coors, V. (2015). *3D Data Models for Urban Energy Simulation*.

Anexo I: Materiales y Compuestos

Tabla 10: Propiedades de los materiales de la base de datos 1980-1989.

Década	Tipo de montaje	Capa	Espesor [m]	Conductividad [W/mK]	Calor Específico [J/kgK]	Densidad [kg/m ³]	U-value [W/m ² K]
1980-89	Curtain wall	Outside glass	0.006	1	800	2400 - 2800	2.09
		Air gap (@ 20C)	0.012	0.0257	1005	1.205	
		Interior glass	0.006	1	800	2400 - 2800	
	Masonry	Brick	0.1016	1.29	795	2080	0.909
		Loose fill 2"	0.0508	1.29	921	2240	
		Brick	0.1016	1.29	795	2080	
	Concrete	4" lightweight conc	0.1016	0.519	837	1600	0.738
		Insulation	0.0762	0.0394	800	16	
		Gyp Board	0.0064	0.1677	1089	800	
	Steel frame	Brick veneer	0.1016	1.29	795	2080	0.454
		Insulation	0.0762	0.0394	800	16	
		Gyp Board	0.0064	0.1677	1089	800	
	Wood frame	Plywood	0.0127	0.1154	1214	544	0.511
		Insulation	0.0762	0.0394	800	16	
		Gyp Board	0.0064	0.1677	1089	800	

Tabla 11: Propiedades de los materiales de la base de datos 1990-1999.

Década	Tipo de montaje	Capa	Espesor [m]	Conductividad [W/mK]	Calor Específico [J/kgK]	Densidad [kg/m3]	U-value [W/m2K]
1990-99	Curtain wall	Outside glass	0.006	1	800	2400 - 2800	2.09
		Air gap (@ 20C)	0.012	0.0257	1005	1.205	
		Interior glass	0.006	1	800	2400 - 2800	
	Masonry	Brick	0.1016	1.29	795	2080	0.909
		Loose fill 2"	0.0508	1.29	921	2240	
		Brick	0.1016	1.29	795	2080	
	Concrete	4" lightweight conc	0.1016	0.519	837	1600	0.738
		Insulation	0.0762	0.0394	800	16	
		Gyp Board	0.0064	0.1677	1089	800	
	Steel frame	Brick veneer	0.1016	1.29	795	2080	0.454
		Insulation	0.0762	0.0394	800	16	
		Gyp Board	0.0064	0.1677	1089	800	
	Wood frame	Plywood	0.0127	0.1154	1214	544	0.511
		Insulation	0.0762	0.0394	800	16	
		Gyp Board	0.0064	0.1677	1089	800	

Tabla 12: Propiedades de los materiales de la base de datos 2000-2009.

Década	Tipo de montaje	Capa	Espesor [m]	Conductividad [W/mK]	Calor Específico [J/kgK]	Densidad [kg/m3]	U-value [W/m2K]
2000-2009	Curtain wall	Outside glass	0.006	1	800	2400 - 2800	2.09
		Air gap (@ 20C)	0.012	0.0257	1005	1.205	
		Interior glass	0.006	1	800	2400 - 2800	
	Masonry	Brick	0.1016	0.894	800	1922.22	0.181
		Concrete block	0.2032	0.4527	880	1380	
		Insulation	0.1397	0.0288	837	32	
		Gyp board	0.0191	0.1586	1130	641	
	Concrete	4" lightweight conc	0.1016	0.519	837	1600	0.738
		Insulation	0.0762	0.0394	800	16	
		Gyp Board	0.0064	0.1677	1089	800	
	Steel frame	Cement board	0.016	0.58	840	1920	0.273
		Gyp board	0.016	0.1586	1130	641	
		Steel stud	0.089	45.3	490	7850	
		Blanket/batt ins	0.1016	0.0288	837	32	
		Gyp board	0.016	0.1586	1130	641	
	Wood frame	Gyp board	0.012	0.2	1130	641	0.177
Glass wool insulation		0.04 - 0.32	0.022 - 0.038	840	24		
Sheathing (plywood)		0.022	0.14	1885	544		
Timber siding		0.012	0.14	523	800		

Tabla 13: Propiedades de los materiales de la base de datos 2010-Presente.

Década	Tipo de montaje	Capa	Espesor [m]	Conductividad [W/mK]	Calor Específico [J/kgK]	Densidad [kg/m3]	U-value [W/m2K]
2010-actualidad	Curtain wall	Outside glass	0.006	1	800	2400 - 2800	2.09
		Air gap (@ 20C)	0.012	0.0257	1005	1.205	
		Interior glass	0.006	1	800	2400 - 2800	
	Masonry	Brick	0.1016	0.894	800	1922.22	0.181
		Concrete block	0.2032	0.4527	880	1380	
		Insulation	0.1397	0.0288	837	32	
		Gyp board	0.0191	0.1586	1130	641	
	Concrete	4" lightweight conc	0.1016	0.519	837	1600	0.738
		Insulation	0.0762	0.0394	800	16	
		Gyp Board	0.0064	0.1677	1089	800	
	Steel frame	Cement board	0.016	0.58	840	1920	0.273
		Gyp board	0.016	0.1586	1130	641	
		Steel stud	0.089	45.3	490	7850	
		Blanket/batt ins	0.1016	0.0288	837	32	
		Gyp board	0.016	0.1586	1130	641	
	Wood frame	Gyp board	0.012	0.2	1130	641	0.177
Glass wool insulation		0.04 - 0.32	0.022 - 0.038	840	24		
Sheathing (plywood)		0.022	0.14	1885	544		
Timber siding		0.012	0.14	523	800		

Tabla 14: Características de muros, tejados y ventanas por tipo de edificio.

Periodo	Tipo	Tipo de montaje	Ventana U value	Ventana G value	Window to wall ratio	Material tejado	Tejado u-value	Tejado shortwave reflectance
Antes 1989	Residential	Wood Frame	4.8	0.45	0.2	Black asphalt shingles + 4 inch concrete	3.25	0.05
	Apartment	Concrete			0.25	Concrete (6 inches)	2.9	0.25
	Office	Masonry			0.25	Concrete (6 inches)	2.9	0.25
	Retail	Masonry			0.2	Concrete (6 inches)	2.9	0.25
1990-1999	Residential	Wood Frame	4.8	0.45	0.2	Black asphalt shingles + 4 inch concrete	3.25	0.05
	Apartment	Concrete			0.25	Concrete (6 inches)	2.9	0.25
	Office	Masonry			0.25	Concrete (6 inches)	2.9	0.25
	Retail	Masonry			0.2	Concrete (6 inches)	2.9	0.25
2000-2009	Residential	Wood Frame 2	3.1	0.48	0.25	Black asphalt shingles + 4 inch concrete	3.25	0.05
	Apartment	Concrete			0.3	Concrete (6 inches)	2.9	0.25
	Office	Curtain Wall			0.35	Concrete (6 inches)	2.9	0.25
	Retail	Steel Frame			0.2	Concrete (6 inches)	2.9	0.25
Después 2012	Residential	Wood Frame 2	2	0.48	0.25	Black asphalt shingles + 4 inch concrete	2.9	0.05
	Apartment	Concrete			0.3	Concrete (6 inches)	2.9	0.25
	Office	Curtain Wall			0.35	Concrete (6 inches)	2.9	0.25
	Retail	Steel Frame			0.2	Concrete (6 inches)	2.9	0.25

Anexo II: Código SQL para crear las tablas de los edificios y de las superficies y comandos para adaptar la base de datos a los diferentes escenarios

```
1. -- Table: data.building
2. -- DROP TABLE data.building;
3. CREATE TABLE data.building
4. (
5.     scenario_id_fk integer,
6.     height real,
7.     sre double precision DEFAULT 1000,
8.     gbaup numeric(4,0) DEFAULT 8017,
9.     grenp numeric(4,0),
10.     gbauj numeric(4,0) DEFAULT 1914,
11.     grenj numeric(4,0) DEFAULT 9999,
12.     gastw numeric(2,0) DEFAULT 6,
13.     status numeric(4,0) DEFAULT 1004,
14.     wall_av_u_value real,
15.     altitude real DEFAULT 373.6,
16.     address text COLLATE pg_catalog."default" DEFAULT
    'Austin_City'::text,
17.     footprint geometry,
18.     building_id_fk integer,
19.     description text COLLATE pg_catalog."default",
20.     composite_id_fk integer,
21.     n_floors numeric(2,0) DEFAULT 4,
22.     window_g_value real NOT NULL DEFAULT 0.7,
23.     ground_k_value real NOT NULL DEFAULT 3,
24.     roof_u_value real NOT NULL DEFAULT 0.3,
25.     wall_shortwave_reflectance real NOT NULL DEFAULT 0
    .4,
26.     roof_shortwave_reflectance real NOT NULL DEFAULT 0
    .4,
27.     t_min_set_point real NOT NULL DEFAULT 21,
28.     t_max_set_point real NOT NULL DEFAULT 26,
29.     infiltration_rate real NOT NULL DEFAULT 0.4,
30.     frame_to_window_ratio real DEFAULT 0.3,
31.     shading_devices boolean NOT NULL DEFAULT false,
32.     adjacent_non_heated_spaces boolean NOT NULL DEFAULT
    T false,
33.     fenestration_ratio_nesw real[] DEFAULT ARRAY[0.25,
    0.0, 0.25, (0)::numeric],
```

```

34.         fenestration_u_value_nesw real[] DEFAULT ARRAY[2.2
      5, 0.0, 2.58, (0)::numeric],
35.         fenestration_openable_ratio_nesw real[] DEFAULT AR
      RAY[2.25, 0.0, 2.58, 0.0],
36.         sia_category integer DEFAULT 1,
37.         floor_area real,
38.         volume real,
39.         egid integer,
40.         fuel_consumption numeric,
41.         indice real,
42.         purpose text COLLATE pg_catalog."default",
43.         zone integer,
44.         buildingtype character varying COLLATE pg_catalog.
      "default",
45.         nofloor_statbl integer,
46.         noroom_statbl integer,
47.         nopeople integer,
48.         heatedarea double precision,
49.         typehousing text COLLATE pg_catalog."default",
50.         occupancytype integer,
51.         blindslambda real,
52.         blindsirradiancecutoff real,
53.         minergiep_walltype integer,
54.         minergiep_floortype integer,
55.         minergiep_rooftype integer,
56.         minergiep_ventilation numeric,
57.         footprint_gis geometry(MultiPolygon,2056) NOT NULL
      ,
58.         an_trans integer,
59.         window_u_value double precision,
60.         year_built integer,
61.         property_id_f integer,
62.         qin real,
63.         qve real,
64.         height_copy real,
65.         envelope real,
66.         centroid_pv geometry,
67.         occupants real,
68.         occupants_floor real,
69.         n_houses integer,
70.         n_floors_copy integer,
71.         n_occupants integer,
72.         CONSTRAINT building_composite_id_fk_fkey FOREIGN K
      EY (composite_id_fk)
73.         REFERENCES data.composite (composite_id) MATCH
      SIMPLE

```

```

74.         ON UPDATE NO ACTION
75.         ON DELETE NO ACTION,
76.     CONSTRAINT building_scenario_id_fkey FOREIGN KEY (
scenario_id_fk)
77.         REFERENCES data.scenario (scenario_id) MATCH S
IMPLE
78.         ON UPDATE NO ACTION
79.         ON DELETE NO ACTION,
80.     CONSTRAINT building_gastw_check CHECK (gastw >= 1:
:numeric AND gastw <= 59::numeric),
81.     CONSTRAINT building_gbaup_check CHECK (gbaup >= 80
11::numeric AND gbaup <= 8023::numeric),
82.     CONSTRAINT enforce_geotype_footprint CHECK (geomet
rytype(footprint) = 'MULTIPOLYGON'::text OR footprint IS NUL
L),
83.     CONSTRAINT enforce_srid_footprint CHECK (st_srid(f
ootprint) = 2056),
84.     CONSTRAINT enforce_dims_footprint CHECK (st_ndims(
footprint_gis) = 2)
85.     )
86.     WITH (
87.         OIDS = TRUE
88.     )
89.     TABLESPACE pg_default;
90.
91.     ALTER TABLE data.building
92.         OWNER to postgres;
93.
94.     -- Trigger: check_orientation_Antes
95.
96.     -
- DROP TRIGGER check_orientation_Antes ON data.building;
97.
98.     CREATE TRIGGER check_orientation_Antes
99.         ANTES INSERT OR UPDATE
100.        ON data.building
101.        FOR EACH ROW
102.        EXECUTE PROCEDURE data.set_orientation();
103.     -- Table: data.ground
104.
105.     -- DROP TABLE data.ground;
106.
107.     CREATE TABLE data.ground
108.     (
109.         ground_type integer,
110.         footprint geometry,

```

```

111.         composite_id_fk integer,
112.         ground_shortwave_reflectance real,
113.         altitude real,
114.         zone integer,
115.         footprint_gis geometry(MultiPolygon,2056),
116.         ground_id_fk integer
117.     )
118.     WITH (
119.         OIDS = FALSE
120.     )
121.     TABLESPACE pg_default;
122.
123.     ALTER TABLE data.ground
124.         OWNER to postgres;
125.     --Convert height from ft to m
126.     UPDATE data.build1 SET height_m = (height*0.3048);
127.     --Calculate number of floors
128.     UPDATE data.build1 SET n_floors = (height_m/3.7 + 1);
129.     --Calculate floor area
130.     UPDATE data.build1 SET floor_area = ST_Area(geom1);
131.     --Calculate volume of buildings:
132.     UPDATE data.building SET volume = height*floor_area;
133.
134.     --Lack of data solution:
135.     --
136.     Buildings with no year of construction and valuation are gro
137.     uped depending on their shape area and number of floors:
138.     UPDATE data.build1 SET type = 'Comm_Apartment' WHERE f
139.     floor_area > 750 AND year_construction IS NULL;
140.     UPDATE data.build1 SET type = 'Comm_Office' WHERE floo
141.     r_area < 750 AND year_construction IS NULL;
142.     --Update type housing labels:
143.     UPDATE data.build1 SET type = 'Apartment' WHERE type =
144.     'Comm_Apartment';
145.     UPDATE data.build1 SET type = 'Office' WHERE type = 'C
146.     omm_Office';
147.     UPDATE data.build1 SET type = 'Retail' WHERE type = 'C
148.     omm_Retail';
149.     UPDATE data.build1 SET type = 'Retail' WHERE type = 'L
150.     and';
151.     UPDATE data.build1 SET type = 'Apartment' WHERE type =
152.     'Comm_Special'
153.     --
154.     Calculate random year of construction for buildings:

```

```

145.     UPDATE data.build1 SET year_construction = data.random
        _between(1919,1959) WHERE (year_construction = 0 OR year_con
        struction IS NULL) AND type = 'Residential';
146.     UPDATE data.build1 SET year_construction = data.random
        _between(1925,1965) WHERE (year_construction = 0 OR year_con
        struction IS NULL) AND type = 'Office';
147.     UPDATE data.build1 SET year_construction = data.random
        _between(1949,1989) WHERE (year_construction = 0 OR year_con
        struction IS NULL) AND type = 'Retail';
148.     UPDATE data.build1 SET year_construction = data.random
        _between(1963,1993) WHERE (year_construction = 0 OR year_con
        struction IS NULL) AND type = 'Apartment';
149.     --Insert data from government database
150.     INSERT INTO data.building (footprint, building_id_fk,
        year_built, floor_area, n_floors, typehousing, height, footp
        rint_gis, property_id_f)
151.     (SELECT geom1, building_f_id, year_construction, floor
        _area, n_floors, type, height_m, geom, property_id FROM data
        .build1);
152.     UPDATE data.building SET gbauj = year_built;
153.
154.     --Insert composite data for all buildings:
155.     UPDATE data.building SET composite_id_fk = 4 WHERE typ
        ehousing = 'Residential' AND year_built <= 1999;
156.     UPDATE data.building SET composite_id_fk = 6 WHERE typ
        ehousing = 'Residential' AND year_built > 1999;
157.     UPDATE data.building SET composite_id_fk = 2 WHERE typ
        ehousing = 'Apartment';
158.     UPDATE data.building SET composite_id_fk = 1 WHERE typ
        ehousing = 'Office' AND year_built <= 1999;
159.     UPDATE data.building SET composite_id_fk = 5 WHERE typ
        ehousing = 'Office' AND year_built > 1999;
160.     UPDATE data.building SET composite_id_fk = 1 WHERE typ
        ehousing = 'Retail' AND year_built <= 1999;
161.     UPDATE data.building SET composite_id_fk = 7 WHERE typ
        ehousing = 'Retail' AND year_built > 1999;
162.
163.     --Insert fenestration values:
164.     UPDATE data.building SET window_u_value = 4.8 WHERE ye
        ar_built <= 1999;
165.     UPDATE data.building SET window_u_value = 3.1 WHERE 19
        99 < year_built AND year_built <= 2009;
166.     UPDATE data.building SET window_u_value = 2 WHERE yea
        r_built > 2009;
167.

```

```

168.     UPDATE data.building SET window_g_value = 0.45 WHERE y
      ear_built <= 1999;
169.     UPDATE data.building SET window_g_value = 0.48 WHERE y
      ear_built > 1999;
170.
171.     --Insert Roof values:
172.     UPDATE data.building SET roof_u_value = 3.25 WHERE typ
      ehousing = 'Residential';
173.     UPDATE data.building SET roof_u_value = 2.9 WHERE type
      housing != 'Residential';
174.
175.     UPDATE data.building SET roof_shortwave_reflectance =
      0.25;
176.
177.     --Insert wall values:
178.     UPDATE data.building SET wall_shortwave_reflectance =
      0.4 WHERE typehousing = 'Residential';
179.     UPDATE data.building SET wall_shortwave_reflectance =
      0.3 WHERE typehousing = 'Apartment';
180.     UPDATE data.building SET wall_shortwave_reflectance =
      0.4 WHERE typehousing = 'Retail';
181.     UPDATE data.building SET wall_shortwave_reflectance =
      0.4 WHERE typehousing = 'Office' AND year_built <= 1999;
182.     UPDATE data.building SET wall_shortwave_reflectance =
      0.1 WHERE typehousing = 'Office' AND year_built > 1999;
183.     --Insert Occupancy type data:
184.     INSERT INTO data.occupancy_type VALUES (1, 35, 0.2, 2,
      0.6, 0.3);
185.     INSERT INTO data.occupancy_type VALUES (2, 19, 0.9, 8,
      1.65, 0);
186.     INSERT INTO data.occupancy_type VALUES (3, 6, 0.9, 3,
      1.65, 0);
187.     INSERT INTO data.occupancy_type VALUES (4, 35, 0.2, 2,
      1.1, 0.3);
188.
189.     UPDATE data.building SET occupancytype = 1 WHERE typeh
      ousing = 'Residential';
190.     UPDATE data.building SET occupancytype = 2 WHERE typeh
      ousing = 'Office';
191.     UPDATE data.building SET occupancytype = 3 WHERE typeh
      ousing = 'Retail';
192.     UPDATE data.building SET occupancytype = 4
193.     WHERE typehousing = 'Apartment';
194.     --Set altitude of buildings and ground:
195.     UPDATE data.building SET altitude = 500;
196.     UPDATE data.ground SET altitude = 499.95;

```



```

197.     --Translate ground and building geometries:
198.     ALTER TABLE data.ground
199.     ALTER COLUMN footprint_gis TYPE geometry(MULTIPOLYGON,
200.     2056)
201.     USING ST_SetSRID(footprint_gis,2056);
202.     ALTER TABLE data.building
203.     ALTER COLUMN footprint_gis TYPE geometry(MULTIPOLYGON,
204.     2056)
205.     USING ST_SetSRID(footprint_gis,2056);
206.     UPDATE data.ground SET footprint_gis = ST_Translate(fo
207.     otprint,5824276,-4793797);
208.     UPDATE data.ground SET footprint_gis = ST_Translate(fo
209.     otprint,5824276,-4793797);
210.     --Insert blind parameters:
211.     UPDATE data.building SET blindslambda = 0.017, blindsi
212.     rradiancecutoff = 400 WHERE typehousing = 'Residential' OR t
213.     ypehousing = 'Apartment';
214.     UPDATE data.building SET blindslambda = 0.017, blindsi
215.     rradiancecutoff = 200 WHERE typehousing = 'Office' OR typeho
216.     using = 'Retail';
217.     -- Normal Scenario:
218.     UPDATE data.building SET qve = ( (floor_area/0.092903
219.     )/100 + 3*7.5 + (5*floor_area*(height- 0.8)*0.05)/(0.028317*
220.     n_floors*60) + 2*20 ) WHERE zone = 2 AND floor_area < 150;
221.     UPDATE data.building SET qve = ( (floor_area/0.092903
222.     )/100 + 4*7.5 + (5*floor_area*(height-
223.     0.8)*0.05)/(0.028317*n_floors*60) + 2*20 ) WHERE zone = 2 AN
224.     D floor_area BETWEEN 150 AND 200;
225.     UPDATE data.building SET qve = ( (floor_area/0.092903
226.     )/100 + 5*7.5 + (5*floor_area*(height-
227.     0.8)*0.05)/(0.028317*n_floors*60) + 3*20 ) WHERE zone = 2 AN
228.     D floor_area BETWEEN 200 AND 250;
229.     UPDATE data.building SET qve = ( (floor_area/0.092903
230.     )/100 + 6*7.5 + (5*floor_area*(height-
231.     0.8)*0.05)/(0.028317*n_floors*60) + 3*20 ) WHERE zone = 2 AN
232.     D floor_area BETWEEN 250 AND 350;
233.     UPDATE data.building SET qve = ( (floor_area/0.092903
234.     )/100 + 7*7.5 + (5*floor_area*(height-
235.     0.8)*0.05)/(0.028317*n_floors*60) + 4*20 ) WHERE zone = 2 AN
236.     D floor_area BETWEEN 350 AND 450;
237.     UPDATE data.building SET qve = ( (floor_area/0.092903
238.     )/100 + 8*7.5 + (5*floor_area*(height-
239.     0.8)*0.05)/(0.028317*n_floors*60) + 5*20 ) WHERE zone = 2 AN
240.     D floor_area > 450;

```

```

217.     UPDATE data.building SET qin = 0.02*(floor_area/0.0929
      03)*20*0.052*1.13*4 WHERE zone = 2;
218.
219.     UPDATE data.building SET infiltration_rate = ((qin+qve
      )*18.288*n_floors/(floor_area/0.092903))/(height-
      0.8) WHERE zone = 2;
220.
221.     UPDATE data.building SET composite_id_fk = 4 WHERE zon
      e = 2 AND year_built <= 1999;
222.     UPDATE data.building SET composite_id_fk = 8 WHERE zon
      e = 2 AND year_built > 1999;
223.
224.     UPDATE data.building SET window_u_value = 4.8 WHERE ye
      ar_built <= 1999;
225.     UPDATE data.building SET window_u_value = 3.1 WHERE 19
      99 < year_built AND year_built <= 2009;
226.     UPDATE data.building SET window_u_value = 2 WHERE yea
      r_built > 2009;
227.     UPDATE data.building SET window_g_value = 0.45 WHERE y
      ear_built <= 1999;
228.     UPDATE data.building SET window_g_value = 0.48 WHERE y
      ear_built > 1999;
229.
230.
231.     -- LEED Scenario 1 (Gold):
232.     UPDATE data.building SET infiltration_rate = (0.176+qv
      e*18.288*n_floors/(floor_area/0.092903))/(height-
      0.8) WHERE zone = 2;
233.
234.     UPDATE data.building SET composite_id_fk = 9 WHERE zon
      e = 2;
235.
236.     UPDATE data.building SET window_u_value = 0.3 WHERE z
      one = 2;
237.     UPDATE data.building SET window_g_value = 0.1875 WHERE
      zone = 2;
238.
239.     -- LEED Scenario 2 (Silver):
240.
241.     UPDATE data.building SET infiltration_rate = (0.258+qv
      e*18.288*n_floors/(floor_area/0.092903))/(height-
      0.8) WHERE zone = 2;
242.
243.     UPDATE data.building SET composite_id_fk = 4 WHERE zon
      e = 2 AND year_built <= 1999;

```

```

244.     UPDATE data.building SET composite_id_fk = 8 WHERE zone
       = 2 AND year_built > 1999;
245.
246.     UPDATE data.building SET window_u_value = 0.4 WHERE zone
       = 2;
247.     UPDATE data.building SET window_g_value = 0.1875 WHERE
       zone = 2;
248.     --Usual Improvement Scenario:
249.
250.     UPDATE data.building SET infiltration_rate = ((qin+qve
       )*18.288*n_floors/(floor_area/0.092903))/(height-
       0.8) WHERE zone = 2;
251.
252.     UPDATE data.building SET composite_id_fk = 4 WHERE zone
       = 2 AND year_built <= 1999;
253.     UPDATE data.building SET composite_id_fk = 8 WHERE zone
       = 2 AND year_built > 1999;
254.
255.     UPDATE data.building SET window_u_value = 1.3 WHERE zone
       = 2;
256.     UPD-- Normal Multifamily Height:
257.     UPDATE data.building SET height = height_copy WHERE zone
       = 1;
258.     UPDATE data.building SET n_floors = height/3.15 WHERE
       zone = 1;
259.     UPDATE data.building SET occupancytype = 4 WHERE zone
       = 1;
260.     UPDATE data.building SET occupants = n_floors*0.76*floor
       area*0.8/35 WHERE zone = 1;
261.     UPDATE data.building SET occupants_floor = occupants/n
       _floors WHERE zone = 1;
262.     UPDATE data.building SET infiltration_rate = 0.6 WHERE
       zone = 1;
263.     UPDATE data.building SET composite_id_fk = 2 WHERE zone
       = 1;
264.     UPDATE data.building SET window_u_value = 1.3 WHERE zone
       = 1;
265.     UPDATE data.building SET window_g_value = 0.3 WHERE zone
       = 1;
266.     UPDATE data.building SET wall_shortwave_reflectance =
       0.3 WHERE zone = 1;
267.     -- Increase one floor:
268.     UPDATE data.building SET height = height + 3.15 WHERE
       zone = 1;
269.     UPDATE data.building SET n_floors = height/3.15 WHERE
       zone = 1;

```

```
270. UPDATE data.building SET window_g_value = 0.3 WHERE zone = 2;
```

Anexo III: Código Matlab para organizar los datos de las simulaciones por edificio y por estación

```
clear all
clc

% load('Residential1_TH.out');
load('LEED_occ_TH.out');
load('LEED_Ids.tsv');
load('Tout.csv');
load('envelope_area.csv');

Residential1_f_TH = LEED_occ_TH;
Residential_Ids = LEED_Ids;
% Obtencion del tiempo
hora = Residential1_f_TH(:,1);
dia = [1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20
21 22 23 24];
n_build = 105;

%% Demanda Termica con floors

% Obtencion de la demanda termica de cada floor
[m,n] = size(Residential1_f_TH);
n_floors = (n - 1 - 7*n_build)/6;

i = 1; j = 3;
for i = 1:n_floors

    if j == (n-11)

        Taf(:,i) = Residential1_f_TH(:,(j-1));
        heatBf(:,i) = Residential1_f_TH(:,j);
        coolBf(:,i) = Residential1_f_TH(:,(j+1));
        Qif(:,i) = Residential1_f_TH(:,(j+2));
        Qsf(:,i) = Residential1_f_TH(:,(j+3));
        electric_conf(:,i) = Residential1_f_TH(:,(j+10));

        count_id(i) = Residential_Ids(j);

    else

        if Residential_Ids(j) == Residential_Ids((j+12))

            heatBf(:,i) = Residential1_f_TH(:,j);
```

```

        coolBf(:,i) = Residential1_f_TH(:,(j+1));
        Taf(:,i) = Residential1_f_TH(:,(j-1));
        Qif(:,i) = Residential1_f_TH(:,(j+2));
        Qsf(:,i) = Residential1_f_TH(:,(j+3));
        count_id(i) = Residential_Ids(j);
        j = j + 6;

    else

        heatBf(:,i) = Residential1_f_TH(:,j);
        coolBf(:,i) = Residential1_f_TH(:,(j+1));
        Taf(:,i) = Residential1_f_TH(:,(j-1));
        Qif(:,i) = Residential1_f_TH(:,(j+2));
        Qsf(:,i) = Residential1_f_TH(:,(j+3));
        electric_conf(:,i) =
Residential1_f_TH(:,(j+10));
        count_id(i) = Residential_Ids(j);
        j = j + 13;

    end

end

end

end

% Obtener la demanda termica de cada edificio
i = 1; j = 1; k = 1;
current_floor = 0;
heatBf_1 = zeros([8760 n_build]);
coolBf_1 = zeros([8760 n_build]);
Taf_1 = zeros([8760 n_build]);
Taf_med = zeros([8760 n_build]);
Qif_1 = zeros([8760 n_build]);
Qsf_1 = zeros([8760 n_build]);
electric_conf_1 = zeros([8760 n_build]);
while i < n_build

    for j = 1:n_floors

        if j == n_floors

            heatBf_1(:,i) = heatBf_1(:,i) + heatBf(:,j);
            coolBf_1(:,i) = coolBf_1(:,i) + coolBf(:,j);
            Taf_1(:,i) = Taf_1(:,i) + Taf(:,j);
            Qif_1(:,i) = Qif_1(:,i) + Qif(:,j);
            Qsf_1(:,i) = Qsf_1(:,i) + Qsf(:,j);
            electric_conf_1(:,i) = electric_conf_1(:,i) +
electric_conf(:,j);

```

```

        current_floor = current_floor + 1;
        Taf_med(:,i) = Taf_1(:,i)/current_floor;
        current_floor = 0;
        build_id(k,1) = count_id(j);

        i = i + 1;
    else

        if count_id(j) == count_id(j+1)

            heatBf_1(:,i) = heatBf_1(:,i) +
heatBf(:,j);
            coolBf_1(:,i) = coolBf_1(:,i) +
coolBf(:,j);
            Taf_1(:,i) = Taf_1(:,i) + Taf(:,j);
            Qif_1(:,i) = Qif_1(:,i) + Qif(:,j);
            Qsf_1(:,i) = Qsf_1(:,i) + Qsf(:,j);
            electric_conf_1(:,i) = electric_conf_1(:,i)
+ electric_conf(:,j);
            current_floor = current_floor + 1;
        else
            heatBf_1(:,i) = heatBf_1(:,i) +
heatBf(:,j);
            coolBf_1(:,i) = coolBf_1(:,i) +
coolBf(:,j);
            Taf_1(:,i) = Taf_1(:,i) + Taf(:,j);
            Qif_1(:,i) = Qif_1(:,i) + Qif(:,j);
            Qsf_1(:,i) = Qsf_1(:,i) + Qsf(:,j);
            electric_conf_1(:,i) = electric_conf_1(:,i)
+ electric_conf(:,j);
            current_floor = current_floor + 1;
            Taf_med(:,i) = Taf_1(:,i)/current_floor;
            current_floor = 0;
            build_id(k,1) = count_id(j);

            k = k + 1;
            i = i + 1;
        end
    end
end
end

%% Analysis by season
clc

i = 1; j = 1;

```

```

winter_heat_1 = zeros([1416 n_build]); winter_cool_1 =
zeros([1416 n_build]); winter_qs_1 = zeros([1416 n_build]);
elec_winter_1 = zeros([1416 n_build]);
winter_qi_1 = zeros([1416 n_build]);
winter_heat_2 = zeros([744 n_build]); winter_cool_2 =
zeros([744 n_build]); winter_qs_2 = zeros([744 n_build]);
elec_winter_2 = zeros([744 n_build]);
winter_qi_2 = zeros([744 n_build]);
spring_heat1 = zeros([2208 n_build]); spring_cool1 =
zeros([2208 n_build]); spring_qs1 = zeros([2208 n_build]);
elec_spring1 = zeros([2208 n_build]);
spring_qi1 = zeros([2208 n_build]);
summer_heat1 = zeros([2208 n_build]); summer_cool1 =
zeros([2208 n_build]); summer_qs1 = zeros([2208 n_build]);
elec_summer1 = zeros([2208 n_build]);
summer_qi1 = zeros([2208 n_build]);
fall_heat1 = zeros([2184 n_build]); fall_cool1 =
zeros([2184 n_build]); fall_qs1 = zeros([2184 n_build]);
elec_fall1 = zeros([2184 n_build]);
fall_qi1 = zeros([2184 n_build]);

ta_winter_1 = zeros([1416 n_build]); ta_winter_2 =
zeros([744 n_build]);
ta_spring1 = zeros([2208 n_build]);
ta_summer1 = zeros([2208 n_build]);
ta_fall1 = zeros([2184 n_build]);

to_winter_1 = zeros([1416 1]); to_winter_2 = zeros([744
1]);
to_spring1 = zeros([2208 1]);
to_summer1 = zeros([2208 1]);
to_fall1 = zeros([2184 1]);

for i = 1:8760

    for j = 1:n_build

        if i < 1417

            winter_heat_1(i,j) = heatBf_1(i,j);
            winter_cool_1(i,j) = coolBf_1(i,j);
            winter_qs_1(i,j) = Qsf_1(i,j);
            winter_qi_1(i,j) = Qif_1(i,j);
            elec_winter_1(i,j) = electric_conf_1(i,j);

            ta_winter_1(i,j) = Taf_med(i,j);
            to_winter_1(i,1) = Tout(i);

```



```

elseif i < 3625

    spring_heat1((i-1416),j) = heatBf_1(i,j);
    spring_cool1((i-1416),j) = coolBf_1(i,j);
    spring_qs1((i-1416),j) = Qsf_1(i,j);
    spring_qil((i-1416),j) = Qif_1(i,j);
    elec_spring1((i-1416),j) =
electric_conf_1(i,j);

    ta_spring1((i-1416),j) = Taf_med(i,j);
    to_spring1((i-1416),1) = Tout(i);

elseif i < 5833

    summer_heat1((i-3624),j) = heatBf_1(i,j);
    summer_cool1((i-3624),j) = coolBf_1(i,j);
    summer_qs1((i-3624),j) = Qsf_1(i,j);
    summer_qil((i-3624),j) = Qif_1(i,j);
    elec_summer1((i-3624),j) =
electric_conf_1(i,j);

    ta_summer1((i-3624),j) = Taf_med(i,j);
    to_summer1((i-3624),1) = Tout(i);

elseif i < 8017

    fall_heat1((i-5832),j) = heatBf_1(i,j);
    fall_cool1((i-5832),j) = coolBf_1(i,j);
    fall_qs1((i-5832),j) = Qsf_1(i,j);
    fall_qil((i-5832),j) = Qif_1(i,j);
    elec_fall1((i-5832),j) = electric_conf_1(i,j);

    ta_fall1((i-5832),j) = Taf_med(i,j);
    to_fall1((i-5832),1) = Tout(i);

elseif i < 8761

    winter_heat_2((i-8016),j) = heatBf_1(i,j);
    winter_cool_2((i-8016),j) = coolBf_1(i,j);
    winter_qs_2((i-8016),j) = Qsf_1(i,j);
    winter_qi_2((i-8016),j) = Qif_1(i,j);
    elec_winter_2((i-8016),j) =
electric_conf_1(i,j);

    ta_winter_2((i-8016),j) = Taf_med(i,j);
    to_winter_2((i-8016),1) = Tout(i);

```

```

        end
    end

    j = 1;

end

i = 1; j = 1;
winter_heat1 = zeros([2160 n_build]); winter_cool1 =
zeros([2160 n_build]); winter_qs1 = zeros([2160 n_build]);
elec_winter1 = zeros([2160 n_build]);
winter_qi1 = zeros([2160 n_build]);
ta_winter1 = zeros([2160 n_build]);
to_winter1 = zeros([2160 1]);
for i = 1:2160

    for j = 1:n_build

        if i < 745

            winter_heat1(i,j) = winter_heat_2(i,j);
            winter_cool1(i,j) = winter_cool_2(i,j);
            winter_qs1(i,j) = winter_qs_2(i,j);
            winter_qi1(i,j) = winter_qi_2(i,j);
            elec_winter1(i,j) = elec_winter_2(i,j);

            ta_winter1(i,j) = ta_winter_2(i,j);
            to_winter1(i,1) = to_winter_2(i);
        else

            winter_heat1(i,j) = winter_heat_1((i-744),j);
            winter_cool1(i,j) = winter_cool_1((i-744),j);
            winter_qs1(i,j) = winter_qs_1((i-744),j);
            winter_qi1(i,j) = winter_qi_1((i-744),j);
            elec_winter1(i,j) = elec_winter_1((i-744),j);

            ta_winter1(i,j) = ta_winter_1((i-744),j);
            to_winter1(i,1) = to_winter_1((i-744));
        end
    end
end

%% Preparacion para boxplots

% Winter
[m,n] = size(winter_heat1);

```

```

avg_win_c1 = zeros([24 n_build]);
avg_win_h1 = zeros([24 n_build]);
avg_win_qil = zeros([24 n_build]);
avg_win_ele1 = zeros([24 n_build]);
s1 = 0; s1 = 0;
i = 0; j = 0; k = 1;

for j = 1:n_build

    for i = 1:m

        avg_win_c1(k,j) = avg_win_c1(k,j) +
winter_cool1(i,j);
        avg_win_h1(k,j) = avg_win_h1(k,j) +
winter_heat1(i,j);
        avg_win_qil(k,j) = avg_win_qil(k,j) +
winter_qil(i,j);
        avg_win_ele1(k,j) = avg_win_ele1(k,j) +
elec_winter1(i,j);

        k = k + 1;;
        if k > 24

            k = 1;
        end
    end
end

avg_win_c1 = avg_win_c1/(m/24);
avg_win_h1 = avg_win_h1/(m/24);
avg_win_qil = avg_win_qil/(m/24);
avg_win_ele1 = avg_win_ele1/(m/24);

% Spring
[m,n] = size(spring_heat1);

avg_spr_c1 = zeros([24 n_build]);
avg_spr_h1 = zeros([24 n_build]);
avg_spr_qil = zeros([24 n_build]);
avg_spr_ele1 = zeros([24 n_build]);
s1 = 0; s1 = 0;
i = 0; j = 0; k = 1;

for j = 1:n_build

    for i = 1:m

```

```

        avg_spr_c1(k,j) = avg_spr_c1(k,j) +
spring_cool1(i,j);
        avg_spr_h1(k,j) = avg_spr_h1(k,j) +
spring_heat1(i,j);
        avg_spr_qil(k,j) = avg_spr_qil(k,j) +
spring_qil(i,j);
        avg_spr_ele1(k,j) = avg_spr_ele1(k,j) +
elec_spring1(i,j);

        k = k + 1;
        if k > 24

                k = 1;
        end
    end
end

avg_spr_c1 = avg_spr_c1/(m/24);
avg_spr_h1 = avg_spr_h1/(m/24);
avg_spr_qil = avg_spr_qil/(m/24);
avg_spr_ele1 = avg_spr_ele1/(m/24);

% Summer
[m,n] = size(summer_heat1);

avg_sum_c1 = zeros([24 n_build]);
avg_sum_h1 = zeros([24 n_build]);
avg_sum_qil = zeros([24 n_build]);
avg_sum_ele1 = zeros([24 n_build]);
s1 = 0; s1 = 0;
i = 0; j = 0; k = 1;

for j = 1:n_build

    for i = 1:m

        avg_sum_c1(k,j) = avg_sum_c1(k,j) +
summer_cool1(i,j);
        avg_sum_h1(k,j) = avg_sum_h1(k,j) +
summer_heat1(i,j);
        avg_sum_qil(k,j) = avg_sum_qil(k,j) +
summer_qil(i,j);
        avg_sum_ele1(k,j) = avg_sum_ele1(k,j) +
elec_summer1(i,j);

        k = k + 1;
        if k > 24

```

```

        k = 1;
    end
end
end

avg_sum_c1 = avg_sum_c1/(m/24);
avg_sum_h1 = avg_sum_h1/(m/24);
avg_sum_qi1 = avg_sum_qi1/(m/24);
avg_sum_ele1 = avg_sum_ele1/(m/24);

% Fall
[m,n] = size(fall_heat1);

avg_fal_c1 = zeros([24 n_build]);
avg_fal_h1 = zeros([24 n_build]);
avg_fal_qi1 = zeros([24 n_build]);
avg_fal_ele1 = zeros([24 n_build]);
s1 = 0; s1 = 0;
i = 0; j = 0; k = 1;

for j = 1:n_build

    for i = 1:m

        avg_fal_c1(k,j) = avg_fal_c1(k,j) + fall_cool1(i,j);
        avg_fal_h1(k,j) = avg_fal_h1(k,j) + fall_heat1(i,j);
        avg_fal_qi1(k,j) = avg_fal_qi1(k,j) + fall_qi1(i,j);
        avg_fal_ele1(k,j) = avg_fal_ele1(k,j) +
elec_fall1(i,j);

        k = k + 1;
        if k > 24

            k = 1;
        end
    end
end

avg_fal_c1 = avg_fal_c1/(m/24);
avg_fal_h1 = avg_fal_h1/(m/24);
avg_fal_qi1 = avg_fal_qi1/(m/24);
avg_fal_ele1 = avg_fal_ele1/(m/24);

% Normalizacion
n_sum_c1 = zeros([24 n_build]); n_sum_h1 = zeros([24
n_build]);

```

```

n_spr_c1 = zeros([24 n_build]); n_spr_h1 = zeros([24
n_build]);
n_win_c1 = zeros([24 n_build]); n_win_h1 = zeros([24
n_build]);
n_fal_c1 = zeros([24 n_build]); n_fal_h1 = zeros([24
n_build]);

for i = 1:n_build

    n_sum_c1(:,i) = avg_sum_c1(:,i)/min(avg_sum_c1(:,i));
    n_spr_c1(:,i) = avg_spr_c1(:,i)/min(avg_spr_c1(:,i));
    n_fal_c1(:,i) = avg_fal_c1(:,i)/min(avg_fal_c1(:,i));
    n_win_c1(:,i) = avg_win_c1(:,i)/min(avg_win_c1(:,i));

    n_spr_h1(:,i) = avg_spr_h1(:,i)/max(avg_spr_h1(:,i));
    n_fal_h1(:,i) = avg_fal_h1(:,i)/max(avg_fal_h1(:,i));
    n_win_h1(:,i) = avg_win_h1(:,i)/max(avg_win_h1(:,i));

end

```

Anexo IV: Código de matlab para representar los resultados

LEED por estación

```
%% Regression horaria
clc
% Obtener la demanda termica por m2 y delta Temperatura

i = 1; j = 1;
cool_area = zeros([8760 n_build]);
heat_area = zeros([8760 n_build]);
for i = 1:8760

    for j = 1:n_build

        heat_area(i,j) =
heatBf_1(i,j)/(envelope_area(j,2)*1000);
        cool_area(i,j) =
abs(coolBf_1(i,j))/(envelope_area(j,2)*1000);

        delta_temp(i,j) = (Tout(i,1) - Taf_med(i,j));
    end
end

summer_c_area = zeros([2208 n_build]);
for i = 1:2208

    for j = 1:n_build

        summer_c_area(i,j) =
abs(summer_cool1(i,j))/(envelope_area(j,2)*1000);
        delta_t_summer(i,j) = (to_summer1(i,1) -
ta_summer1(i,j));
    end
end

winter_h_area = zeros([2160 n_build]);
for i = 1:2160

    for j = 1:n_build

        winter_h_area(i,j) =
winter_heat1(i,j)/(envelope_area(j,2)*1000);
        delta_t_winter(i,j) = (to_winter1(i,1) -
ta_winter1(i,j));
    end
end
```

```

for i=1:1:n_build
    mdl1 = fitlm(delta_t_summer(:,i),summer_c_area(:,i)');
    R(i,1) = mdl1.Rsquared.Adjusted;
    mdl2 = fitlm(delta_t_winter(:,i),winter_h_area(:,i)');
    R(i,2) = mdl2.Rsquared.Adjusted;
End

%% Calculate rates for models 2, 3 and 4

[m,n_build] = size(spring_cool1);
i = 0;

for i = 1:n_build

    n_spr_c2(:,i) = avg_spr_c2(:,i)/min(avg_spr_c1(:,i));
    n_spr_h2(:,i) = avg_spr_h2(:,i)/max(avg_spr_h1(:,i));

    n_spr_c3(:,i) = avg_spr_c3(:,i)/min(avg_spr_c1(:,i));
    n_spr_h3(:,i) = avg_spr_h3(:,i)/max(avg_spr_h1(:,i));

    n_spr_c4(:,i) = avg_spr_c4(:,i)/min(avg_spr_c1(:,i));
    n_spr_h4(:,i) = avg_spr_h4(:,i)/max(avg_spr_h1(:,i));

end

%% Plots Heating

figure(1)
% subplot(2,1,1)
boxplot((n_spr_h1.'))
ylim([0 1.01])
title('Spring Base Case','FontSize',18)
xlabel('Time h','FontSize',18)
ylabel('Heating Demand (scaled)','FontSize',18)

figure(2)
%subplot(2,1,2)
boxplot((n_spr_h2.'))
ylim([0 1.01])
title('Spring Usual Improvement','FontSize',18)
xlabel('Time h','FontSize',18)
ylabel('Heating Demand (scaled)','FontSize',18);

figure(3)
%subplot(2,1,1)

```



```

boxplot((n_spr_h3.'))
ylim([0 1.01])
title('Spring LEED Silver','FontSize',18)
xlabel('Time h','FontSize',18)
ylabel('Heating Demand (scaled)','FontSize',18)

figure(4)
% subplot(2,1,2)
boxplot((n_spr_h4.'))
ylim([0 1.01])
title('Spring LEED Gold','FontSize',18)
xlabel('Time h','FontSize',18)
ylabel('Heating Demand (scaled)','FontSize',18);

%% Plots Cooling

figure(5)
% subplot(2,1,1)
boxplot((n_spr_c1.'))
set(gca,'fontsize',11)
ylim([0 1.01])
title('Spring Base Case','FontSize',25)
xlabel('Time h','FontSize',18)
ylabel('Cooling Demand (scaled)','FontSize',18)

figure(6)
%subplot(2,1,2)
boxplot((n_spr_c2.'))
set(gca,'fontsize',11)
ylim([0 1.01])
title('Spring Usual Improvement','FontSize',25)
xlabel('Time h','FontSize',18)
ylabel('Cooling Demand (scaled)','FontSize',18);

figure(7)
%subplot(2,1,1)
boxplot((n_spr_c3.'))
set(gca,'fontsize',11)
ylim([0 1.01])
title('Spring LEED Silver','FontSize',25)
xlabel('Time h','FontSize',18)
ylabel('Cooling Demand (scaled)','FontSize',18)

figure(8)
% subplot(2,1,2)
boxplot((n_spr_c4.'))

```

```
set(gca,'fontsize',11)
ylim([0 1.01])
title('Spring LEED Gold','FontSize',25)
xlabel('Time h','FontSize',18)
ylabel('Cooling Demand (scaled)','FontSize',18);
```

Anexo V: Código Matlab para representar los resultados de aumento de la población

```
clear all
clc

%% Consumo total del distrito avg

[hora n_build] = size(avg_fal_c);

% Fall
for i = 1:5
    if i == 1
        heat_tot_fal(i) = sum(sum(avg_fal_h));
        cool_tot_fal(i) = sum(sum(abs(avg_fal_c)));
        elec_tot_fal(i) = sum(sum(avg_fal_ele));
        qi_tot_fal(i) = sum(sum(avg_fal_qi));
        occ_tot(i) = sum(Occupants(:,4));
    elseif i == 2
        heat_tot_fal(i) = sum(sum(avg_fal_h1));
        cool_tot_fal(i) = sum(sum(abs(avg_fal_c1)));
        elec_tot_fal(i) = sum(sum(avg_fal_ele1));
        qi_tot_fal(i) = sum(sum(avg_fal_qi1));
        occ_tot(i) = sum(Occupants1(:,4));
    elseif i == 3
        heat_tot_fal(i) = sum(sum(avg_fal_h2));
        cool_tot_fal(i) = sum(sum(abs(avg_fal_c2)));
        elec_tot_fal(i) = sum(sum(avg_fal_ele2));
        qi_tot_fal(i) = sum(sum(avg_fal_qi2));
        occ_tot(i) = sum(Occupants2(:,4));
    elseif i == 4
        heat_tot_fal(i) = sum(sum(avg_fal_h3));
        cool_tot_fal(i) = sum(sum(abs(avg_fal_c3)));
        elec_tot_fal(i) = sum(sum(avg_fal_ele3));
        qi_tot_fal(i) = sum(sum(avg_fal_qi3));
        occ_tot(i) = sum(Occupants3(:,4));
    elseif i == 5
        heat_tot_fal(i) = sum(sum(avg_fal_h4));
        cool_tot_fal(i) = sum(sum(abs(avg_fal_c4)));
        elec_tot_fal(i) = sum(sum(avg_fal_ele4));
        qi_tot_fal(i) = sum(sum(avg_fal_qi4));
        occ_tot(i) = sum(Occupants4(:,4));
    end
end
```

```

end
% Summer
for i = 1:5
    if i == 1
        heat_tot_sum(i) = sum(sum(avg_sum_h));
        cool_tot_sum(i) = sum(sum(abs(avg_sum_c)));
        elec_tot_sum(i) = sum(sum(avg_sum_ele));
        qi_tot_sum(i) = sum(sum(avg_sum_qi));
    elseif i == 2
        heat_tot_sum(i) = sum(sum(avg_sum_h1));
        cool_tot_sum(i) = sum(sum(abs(avg_sum_c1)));
        elec_tot_sum(i) = sum(sum(avg_sum_ele1));
        qi_tot_sum(i) = sum(sum(avg_sum_qi1));
    elseif i == 3
        heat_tot_sum(i) = sum(sum(avg_sum_h2));
        cool_tot_sum(i) = sum(sum(abs(avg_sum_c2)));
        elec_tot_sum(i) = sum(sum(avg_sum_ele2));
        qi_tot_sum(i) = sum(sum(avg_sum_qi2));
    elseif i == 4
        heat_tot_sum(i) = sum(sum(avg_sum_h3));
        cool_tot_sum(i) = sum(sum(abs(avg_sum_c3)));
        elec_tot_sum(i) = sum(sum(avg_sum_ele3));
        qi_tot_sum(i) = sum(sum(avg_sum_qi3));
    elseif i == 5
        heat_tot_sum(i) = sum(sum(avg_sum_h4));
        cool_tot_sum(i) = sum(sum(abs(avg_sum_c4)));
        elec_tot_sum(i) = sum(sum(avg_sum_ele4));
        qi_tot_sum(i) = sum(sum(avg_sum_qi4));
    end
end
% Spring
for i = 1:5
    if i == 1
        heat_tot_spr(i) = sum(sum(avg_spr_h));
        cool_tot_spr(i) = sum(sum(abs(avg_spr_c)));
        elec_tot_spr(i) = sum(sum(avg_spr_ele));
        qi_tot_spr(i) = sum(sum(avg_spr_qi));
    elseif i == 2
        heat_tot_spr(i) = sum(sum(avg_spr_h1));
        cool_tot_spr(i) = sum(sum(abs(avg_spr_c1)));
        elec_tot_spr(i) = sum(sum(avg_spr_ele1));
        qi_tot_spr(i) = sum(sum(avg_spr_qi1));
    elseif i == 3
        heat_tot_spr(i) = sum(sum(avg_spr_h2));

```

```

        cool_tot_spr(i) = sum(sum(abs(avg_spr_c2)));
        elec_tot_spr(i) = sum(sum(avg_spr_ele2));
        qi_tot_spr(i) = sum(sum(avg_spr_qi2));
    elseif i == 4
        heat_tot_spr(i) = sum(sum(avg_spr_h3));
        cool_tot_spr(i) = sum(sum(abs(avg_spr_c3)));
        elec_tot_spr(i) = sum(sum(avg_spr_ele3));
        qi_tot_spr(i) = sum(sum(avg_spr_qi3));
    elseif i == 5
        heat_tot_spr(i) = sum(sum(avg_spr_h4));
        cool_tot_spr(i) = sum(sum(abs(avg_spr_c4)));
        elec_tot_spr(i) = sum(sum(avg_spr_ele4));
        qi_tot_spr(i) = sum(sum(avg_spr_qi4));
    end
end
% Winter
for i = 1:5
    if i == 1
        heat_tot_win(i) = sum(sum(avg_win_h));
        cool_tot_win(i) = sum(sum(abs(avg_win_c)));
        elec_tot_win(i) = sum(sum(avg_win_ele));
        qi_tot_win(i) = sum(sum(avg_win_qi));
    elseif i == 2
        heat_tot_win(i) = sum(sum(avg_win_h1));
        cool_tot_win(i) = sum(sum(abs(avg_win_c1)));
        elec_tot_win(i) = sum(sum(avg_win_ele1));
        qi_tot_win(i) = sum(sum(avg_win_qi1));
    elseif i == 3
        heat_tot_win(i) = sum(sum(avg_win_h2));
        cool_tot_win(i) = sum(sum(abs(avg_win_c2)));
        elec_tot_win(i) = sum(sum(avg_win_ele2));
        qi_tot_win(i) = sum(sum(avg_win_qi2));
    elseif i == 4
        heat_tot_win(i) = sum(sum(avg_win_h3));
        cool_tot_win(i) = sum(sum(abs(avg_win_c3)));
        elec_tot_win(i) = sum(sum(avg_win_ele3));
        qi_tot_win(i) = sum(sum(avg_win_qi3));
    elseif i == 5
        heat_tot_win(i) = sum(sum(avg_win_h4));
        cool_tot_win(i) = sum(sum(abs(avg_win_c4)));
        elec_tot_win(i) = sum(sum(avg_win_ele4));
        qi_tot_win(i) = sum(sum(avg_win_qi4));
    end
end
end

```

```

%% Plots

figure(1)
plot(100*(occ_tot/occ_tot(1)-1),
100*(elec_tot_fal/elec_tot_fal(1)-1), 'Linewidth',2)
hold on
plot(100*(occ_tot/occ_tot(1)-1),
100*(elec_tot_sum/elec_tot_sum(1)-1), 'Linewidth',2)
hold on
plot(100*(occ_tot/occ_tot(1)-1),
100*(elec_tot_win/elec_tot_win(1)-1), 'Linewidth',2)
hold on
plot(100*(occ_tot/occ_tot(1)-1),
100*(elec_tot_spr/elec_tot_spr(1)-1), 'Linewidth',2)
hold off
xlabel('% Population growth change')
ylabel('% Electric consumption increase')
xlim([0 60])
ylim([0 50])
title('Electric Consumption Evolution by
Season', 'FontSize',14)
legend('Fall', 'Summer', 'Winter', 'Spring');

figure(2)
plot(100*(occ_tot/occ_tot(1)-1),
100*(heat_tot_fal/heat_tot_fal(1)-1), 'Linewidth',2)
hold on
plot(100*(occ_tot/occ_tot(1)-1),
100*(heat_tot_win/heat_tot_win(1)-1), 'Linewidth',2)
hold on
plot(100*(occ_tot/occ_tot(1)-1),
100*(heat_tot_spr/heat_tot_spr(1)-1), 'Linewidth',2)
hold off
xlabel('% Population growth change')
ylabel('% Heating demand increase')
xlim([0 60])
ylim([0 50])
title('Heating Demand Evolution by
Season', 'FontSize',14)
legend('Fall', 'Winter', 'Spring');

figure(3)

```

```

plot(100*(occ_tot/occ_tot(1)-1),
100*(cool_tot_fal/cool_tot_fal(1)-1), 'Linewidth',2)
hold on
plot(100*(occ_tot/occ_tot(1)-1),
100*(cool_tot_sum/cool_tot_sum(1)-1), 'Linewidth',2)
hold on
plot(100*(occ_tot/occ_tot(1)-1),
100*(cool_tot_spr/cool_tot_spr(1)-1), 'Linewidth',2)
hold off
xlabel('% Population growth change')
ylabel('% Cooling demand increase')
xlim([0 60])
ylim([0 50])
title('Cooling Demand Evolution by
Season', 'FontSize',14)
legend('Fall', 'Summer', 'Spring');

figure(4)
plot(100*(occ_tot/occ_tot(1)-1),
100*(qi_tot_fal/qi_tot_fal(1)-1), 'Linewidth',2)
hold on
plot(100*(occ_tot/occ_tot(1)-1),
100*(qi_tot_sum/qi_tot_sum(1)-1), 'Linewidth',2)
hold on
plot(100*(occ_tot/occ_tot(1)-1),
100*(qi_tot_spr/qi_tot_spr(1)-1), 'Linewidth',2)
hold on
plot(100*(occ_tot/occ_tot(1)-1),
100*(qi_tot_win/qi_tot_win(1)-1), 'Linewidth',2)
hold off
xlabel('% Occupancy growth')
ylabel('% Heat Gains Growth')
title('Heat Gains evolution by season')
legend('Fall', 'Summer', 'Spring', 'Winter');

```