



Universidad
Zaragoza

Trabajo Fin de Máster

Metodología de clasificación de consumos y análisis
de eficiencia energética en edificios municipales

Methodology for classifying energy consumption
and analysing energy efficiency in municipal
buildings

Autor

Alfredo Bernués Soto

Director

José María Yusta Loyo

Titulación del autor

Máster Universitario en Energías Renovables y Eficiencia Energética

ESCUELA DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

Junio de 2024

Trabajo de Fin de Máster

Energías Renovables y Eficiencia Energética

Metodología de clasificación de consumos y análisis de eficiencia energética en edificios municipales

Autor: Alfredo Bernués Soto

Director: José María Yusta Loyo



Universidad Zaragoza

Dep. Ingeniería Eléctrica
Escuela de Ingeniería y Arquitectura
Zaragoza, 2023



Escuela de
Ingeniería y Arquitectura
Universidad Zaragoza

AGRADECIMIENTOS

Este Trabajo de Fin de Máster es la culminación de una etapa que, como tantas otras, no hubiera sido posible sin el esfuerzo de mis padres, a quienes en estas líneas agradezco su apoyo incondicional.

Quisiera también mencionar el enorme apoyo que supone la cercanía de mi familia, pareja y amigos.

Finalmente, agradecer a José María Yusta por su valiosa orientación y enseñanzas.

Alfredo Bernués Soto

Zaragoza, 2024

RESUMEN

En el contexto de la Cátedra de transición energética municipal, colaboración entre la Universidad de Zaragoza y el Ayuntamiento de Zaragoza, las líneas que continúan exploran la situación de los sistemas de gestión energética en administraciones municipales: su implantación, seguimiento y normativas que los regulan y certifican.

Uno de los aspectos más importantes de los sistemas de gestión energética consiste en evaluar de forma cuantitativa el desempeño energético de un edificio. Para ello, las guías y normas existentes dan una serie de pautas acerca de los criterios de selección de indicadores de desempeño energético, así como de la generación y utilización de líneas base para la caracterización del comportamiento energético del edificio. El método a emplear para la obtención de esta línea base queda a elección del técnico usuario de la normativa.

El presente proyecto final de máster tiene como objetivo explorar la aplicación de métodos para la obtención de líneas base energéticas de edificios municipales de tipo gran terciario para su aplicación a los equipamientos gestionados por el Ayuntamiento de Zaragoza.

Se tomarán datos de consumo de edificios y variables meteorológicas como punto de partida para la aplicación de dos métodos: Regresión lineal simple y Clustering. Se comprobará la precisión de los modelos obtenidos al comparar las estimaciones con datos de consumo reales. Por último, se hará una valoración general de la aplicabilidad de estos métodos y una valoración personal sobre su adecuación al problema planteado.

INDICE

AGRADECIMIENTOS.....	3
RESUMEN	4
INDICE.....	6
INDICE DE TABLAS	8
INDICE DE FIGURAS	9
1 INTRODUCCIÓN.....	11
2 ESTADO DEL ARTE.....	13
2.1 Guías de referencia	14
2.1.1 Guía ASHRAE 14 2002.....	14
2.1.2 IPMVP. EVO	16
2.1.3 DOE Uniform Methods Project	17
2.2 Normativa	19
2.2.1 UNE-EN ISO 50001:2018.....	19
2.2.2 ISO 50002:2014	21
2.2.3 UNE-ISO 50003:2018	22
2.2.4 UNE-ISO 50004:2022	22
2.2.5 ISO 50006:2014	23
2.2.6 ISO 50015:2014	26
3 ADECUACIÓN DEL PLAN ESTRATÉGICO DE ENERGÍA Y CLIMA DEL AYUNTAMIENTO DE ZARAGOZA A LA NORMATIVA.....	28
3.1 Política energética.....	28
3.2 Planificación energética	29
3.3 Implementación y operación	32
3.4 Verificación	35
3.4.1 Seguimiento y medición	35
3.4.2 Auditoría interna	36
3.5 Conclusiones	37
4 METODOLOGÍAS DE OBTENCIÓN DE LÍNEAS BASE.....	38
4.1 Tipos de línea base.....	38
4.2 Regresión lineal simple	39
4.2.1 Seleccionar un periodo de datos representativo y adecuado	39
4.2.2 Preparar los datos.....	39
4.2.3 Graficar los datos.....	39

4.2.4	Generar línea de tendencia	39
4.2.5	Calcular e interpretar el coeficiente de determinación R^2	40
4.3	Clustering	41
4.3.1	Distancia euclidiana	42
4.3.2	Índice de Davies-Bouldin	42
4.3.3	K-means	43
4.3.4	Matlab	43
4.4	Objetivos	45
5	CASOS A ESTUDIO	47
5.1	CASO 1: Edificio Seminario	47
5.1.1	Alcance	47
5.1.2	Emplazamiento	47
5.1.3	Análisis de consumos del edificio a estudio	48
5.1.4	ESTUDIO 1. Desglose de consumos	51
5.1.5	ESTUDIO 2. Obtención de una línea base del Edificio Seminario	60
5.2	CASO 2: Centro deportivo municipal Palafox	69
5.2.1	Alcance	69
5.2.2	Emplazamiento	69
5.2.3	Análisis de consumos del edificio a estudio	70
5.2.4	Datos de entrada	71
5.2.5	Regresión lineal	72
5.2.6	Clustering	73
5.2.7	Testing	74
5.2.8	Conclusiones	76
6	CONCLUSIONES	78
	REFERENCIAS	80

INDICE DE TABLAS

Tabla 1 Medidas expuestas en el PEECAZ.....	34
Tabla 2 Fragmento datos de partida. CASO1, Estudio 1.....	52
Tabla 3 Medidas estadísticas variables de entrada. CASO1, Estudio 1.....	52
Tabla 4 Variables Normalizadas. CASO1, Estudio 1.	52
Tabla 5 Número Óptimo de Clústeres. CASO1, Estudio 1.....	53
Tabla 6 Clústeres. CASO1, Estudio 1.	54
Tabla 7 Heatmap clústeres. CASO1, Estudio 1.....	54
Tabla 8 Cálculo consumo fijo. CASO1, Estudio 1.	56
Tabla 9 Cálculo consumo ocupación. CASO1, Estudio 1.....	56
Tabla 10 Fragmento de los consumos diarios desglosados. CASO1, Estudio 1.	57
Tabla 11 Desglose de consumos mes de octubre. CASO1, Estudio 1.	58
Tabla 12 Variables Normalizadas. CASO1. Estudio2. Clustering.....	65
Tabla 13 Error de estimación distintas líneas base, Edificio Seminario. CASO 1. Estudio 2.	66
Tabla 14 Conjunto de datos de entrada atípicos. CASO1. Estudio2	68
Tabla 15 Fragmento datos de partida. CASO2.....	72
Tabla 16 Correlación variables de entrada. CASO2. Regresión lineal.....	73
Tabla 17 Ecuaciones de las rectas y condiciones. CASO2. Regresión lineal.	73
Tabla 18 Variables de entrada normalizadas. CASO2. Clustering.	74
Tabla 19 Fragmento conjunto clústeres. CASO2. Clustering.	74
Tabla 20 Conjunto de datos de testing. CASO2. Clustering.	75
Tabla 21 Regresión lineal testing. CASO2. Clustering.	75
Tabla 22 Clustering testing. CASO2. Clustering.	76
Tabla 23 Error de estimación Electricidad. CASO 2. CDM Palafox.....	76
Tabla 24 Error de estimación Gas. CASO 2. CDM Palafox.....	77

INDICE DE FIGURAS

Figura 1 Método básico de la Guía ASHRAE para determinar ahorros.	15
Figura 2 Esquema general de la Guía ASHRAE para la medición de ahorro de energía.....	15
Figura 3 Construcción y uso de la línea base. Fuente: IPMVP, EVO.....	16
Figura 4 Ahorro en función del uso y desempeño. Fuente: IPMVP, EVO.	18
Figura 5 Métodos de M&V. Aislamiento de la actualización (A y B). Instalación entera (C y D) Fuente: IPMVP, EVO.....	19
Figura 6 Modelo de sistema de gestión de la energía. Fuente: ISO 50001	20
Figura 7 Indicadores de desempeño y Líneas base de Energía. Fuente: ISO 50004.....	22
Figura 8 Visión general sobre la medición de la eficiencia energética. Fuente: ISO 50006	23
Figura 9 Relevancia de variables según ISO 50006.....	24
Figura 10 Conceptos de período de línea base y período de informe de un IDE. Fuente: ISO 50006	25
Figura 11 Pasos fundamentales en el proceso de M&V. Fuente: ISO 50015.....	27
Figura 12 Proceso de planificación energética ampliado. Fuente: AENOR	29
Figura 13 Distribución de consumos por uso, año 2019. Fuente: PEECAZ.....	30
Figura 14 Fuentes principales de energía, año 2019. Fuente: PEECAZ	30
Figura 15 Evolución indicadores de desempeño energético equipamientos (kWh/m2). Fuente: PEECAZ	30
Figura 16 Consumos mensuales Edificio Seminario y Línea Base, 2021. Fuente: PEECAZ	31
Figura 17 Tabla de requisitos por objetivo, Fuente: NQA.....	32
Figura 18 Consumo de Equipamientos Singulares frente al total, 2022. Fuente: PEECAZ	36
Figura 19 Regresión lineal con una variable dependiente y una variable independiente	40
Figura 20 Centroides y clústeres.	41
Figura 21 Obtención de OptimalK en Matlab.....	44
Figura 22 Función kmeans en Matlab.	44
Figura 23 Asignación de observaciones en clústeres en Matlab.....	45
Figura 24 Emplazamiento Edificio Seminario. fuente: Google maps	48
Figura 25 Modelo 3D Edificio Seminario. Fuente: Google Earth	48
Figura 26 Disponibilidad de datos y consideraciones en el histórico. CASO1.	50
Figura 27 Consumos frente a temperatura media exterior. CASO1, Estudio 1.	55
Figura 28 Consumos desglosados mensuales. CASO1, Estudio 1.....	57
Figura 29 Consumos mensuales Edificio Seminario y LB PEECAZ (2023). CASO1. Estudio 2.	62
Figura 30 Correlación consumo-temperatura, Edificio Seminario. CASO1. Estudio2. Regresión lineal.....	62

Figura 31 Agrupación automática consumo-temperatura, Edificio Seminario. CASO1. Estudio2. Regresión lineal.	63
Figura 32 Grupos de datos Edificio Seminario. CASO1. Estudio2. Regresión lineal.	64
Figura 33 Ecuaciones de las rectas y condiciones. CASO1. Estudio2. Regresión lineal.	64
Figura 34 Consumos mensuales Edificio Seminario y Línea Base Regresión lineal (2023). CASO1. Estudio2. Regresión lineal.	65
Figura 35 Consumos mensuales Edificio Seminario y Línea Base Clustering (2023). CASO1. Estudio2. Clustering.....	66
Figura 36 Comparación de distintas líneas base vs. Edificio Seminario (2023). CASO1. Estudio 2.	67
Figura 37 Valores atípicos indicados en naranja. CASO1 Estudio 2.....	68
Figura 38 Emplazamiento CDM Palafox. fuente: Google maps	70
Figura 39 Modelo 3D CDM Palafox. Fuente: Google Earth	70
Figura 40 Representación variables, año 2022. CASO2.....	72
Figura 41 Regresiones de gas y electricidad. CASO2. Regresión lineal.	73

1 INTRODUCCIÓN

Este proyecto de fin de Máster con título “Metodología de clasificación de consumos y análisis de eficiencia energética en edificios municipales” ha sido elaborado por Alfredo Bernués Soto y dirigido por José María Yusta.

La energía se ha convertido en un elemento esencial para el desarrollo económico y el bienestar social. Lógicamente, tanto su calidad como su coste económico ha pasado a convertirse en un referente socioeconómico a tener muy en cuenta. Este carácter estratégico de la energía ha condicionado la promoción de la eficiencia energética y el uso racional de la misma. El conjunto de sucesos globales que condicionan la problemática energética, a saber, nuestra dependencia energética exterior, la necesidad de preservar el medio ambiente y el asegurar un desarrollo sostenible obliga al fomento de fórmulas eficaces para un uso eficiente de la energía y la utilización de fuentes limpias.

En enero de 2020 el estado español publica el **Plan Nacional Integrado de Energía y Clima 2021-2030** (PNIEC), el cual marca la hoja de ruta en materia de cambio climático y transición energética hacia el horizonte 2030. En consecuencia, el Ayuntamiento de Zaragoza decide fomentar y poner en marcha un **Plan Estratégico de Energía y Clima** (PEECAZ). El objeto de dicho plan consiste en establecer un marco estratégico que integre las medidas de eficiencia energética, reducción de emisiones de gases de efecto invernadero y adaptación frente al cambio climático que el Ayuntamiento de Zaragoza desarrollará a lo largo del periodo 2021-2030. En este documento se traza el plan que trata de abarcar la gestión de los más de **820 equipamientos** municipales y **2083 contratos energéticos** con un volumen total de consumos de **160 GWh anuales** (2019) que el Ayto. de Zaragoza gestiona.

La importancia del uso de la energía que afecta a los aspectos ambientales, económicos y sociales, dio lugar a la creación de una norma internacional en **sistemas de gestión de la energía** (SGE) por parte de la Organización Internacional de Estandarización (ISO por sus siglas en inglés) denominada norma **ISO 50001** y está transpuesta a normas europeas y a la norma española UNE. Esta norma ofrece las directrices para mejorar el desempeño energético en las organizaciones, logrando con ello una mejora en la productividad, en la calidad de vida y en la disminución de las emisiones de gases de efecto invernadero que provocan el calentamiento global, afectando al cambio climático [1].

Para alcanzar los objetivos de la ISO 50001 se requiere la implementación de una serie de herramientas y procedimientos técnicos que incluyen la identificación del uso significativo de la energía, el establecimiento de una línea base, el control operacional de la eficiencia energética, la identificación de las variables significativas del uso de la energía y la identificación de oportunidades de mejora del desempeño energético.

El presente trabajo tiene por objeto analizar la gestión energética que lleva a cabo el Ayto. de Zaragoza actualmente y que se refleja en el **PEECAZ**, valorar su adecuación a los requisitos exigidos por la normativa ISO en lo referente a SGE, y proponer una metodología de obtención de **líneas base energéticas** (LBE) aplicable a los edificios que gestiona el ayuntamiento.

Con el fin de describir de forma clara esta tarea, así como su alcance y contexto, la memoria se divide en los siguientes apartados:

1.Introducción: Tiene como objetivo contextualizar el trabajo, justificar la importancia del tema tratado y orientar al lector acerca del enfoque y la estructura del presente proyecto.

2.Estado del arte: Donde se presenta una completa revisión bibliográfica tanto de la normativa vigente como de las principales guías sobre sistemas de gestión energética publicadas por entidades de renombre.

3.Adecuación Plan Estratégico de Energía y Clima del Ayuntamiento de Zaragoza a la normativa: Este bloque del trabajo tiene por objeto el trazar una comparativa entre el plan energético elaborado por el Ayto. de Zaragoza y los requisitos exigidos por la normativa de Sistemas de Gestión energética.

4.Metodologías: Pretende describir las distintas metodologías de caracterización de consumos y obtención de líneas base que han sido implementadas para la evaluación de los casos a estudio en el presente proyecto.

5.Casos a estudio: Este bloque contiene una explicación extensa del estudio realizado sobre dos edificios gestionados por el Ayuntamiento de Zaragoza: El edificio Seminario y el centro deportivo municipal Palafox. Se evalúa el uso de las metodologías planteadas como herramientas de medición de ahorros y gestión energética.

6.Conclusiones: La exposición de las conclusiones obtenidas a partir del estudio realizado.

2 ESTADO DEL ARTE

Lo principal a la hora de llevar a cabo la gestión energética en una organización es tener una idea clara del uso que le estamos dando a esa energía. ¿Cuánto se está consumiendo? ¿De qué fuentes? ¿En qué procesos? ¿De qué depende ese consumo?...

Es por esto por lo que existe una extensa bibliografía en lo referente a guías de procedimientos de verificación y medida (M&V por sus siglas en inglés) de consumos energéticos. La M&V, cuando se aplica correctamente, permite a los responsables de la gestión energética conocer cómo se comporta un sistema y, en caso de implementar una mejora de eficiencia, cuantificar el ahorro asociado a ésta.

Pero la M&V sólo nos da información del sistema. Si realmente queremos hacer un uso eficiente de la energía a largo plazo, es necesario implantar un conjunto de procesos, políticas y procedimientos organizados y coordinados para gestionar el uso de la energía. A este conjunto de procesos que se mantiene en el tiempo y se actualiza periódicamente se lo conoce como Sistema de Gestión de la Energía (SGE).

Este bloque del trabajo contiene en primer lugar una revisión bibliográfica de las principales guías de referencia en protocolos de M&V:

- Guía ASHRAE 14 2002, publicada por la Sociedad Estadounidense de Ingenieros de Calefacción, Refrigeración y Aire Acondicionado.
- IPMVP. Protocolo Internacional de Medición y Verificación del Desempeño, publicado y mantenido por Efficiency Valuation Organization.
- Uniform methods project. Conjunto de protocolos de M&V creado por el departamento de energía de Estados Unidos.

Una vez repasadas estas guías, se procede a resumir la normativa internacional en materia de SGE:

- UNE-ISO 50001
- ISO 50002
- UNE-ISO 50003
- UNE-ISO 50004
- ISO 50006
- ISO 50015

Todas las normas incluidas en este listado pertenecen al estándar ISO. Las normas UNE (Una Norma Española) publicadas por AENOR que aparecen en este listado son traducciones al español de la norma internacional. La ISO 50001 es la norma que define y fundamenta los SGE, mientras que las demás normas amplían contenidos sobre aspectos concretos de ésta (implantación, auditorías, uso y mantenimiento de líneas base...).

El contenido de estas guías y normas será relevante en apartados posteriores, donde se llevará a cabo un estudio de la adecuación del Plan Estratégico de Energía y Clima del Ayuntamiento de Zaragoza a estos textos.

2.1 Guías de referencia

2.1.1 Guía ASHRAE 14 2002

Publicada en 2002 por la Sociedad Estadounidense de Ingenieros de Calefacción, Refrigeración y Aire Acondicionado (ASHRAE por sus siglas en inglés), el principal fin de este documento [2] es valorar el ahorro energético tras una ECM (Energy Conservation Measure), es decir, la implementación de una medida de mejora de la eficiencia energética.

La guía contiene un conjunto de procedimientos de cálculo de ahorro de energía (y demanda) para proyectos de gestión energética aplicados a edificios residenciales, comerciales o industriales.

Muchos proyectos de gestión energética involucran la sustitución de equipos de calefacción, refrigeración o iluminación que están influenciados por factores como el clima y horarios de ocupación variables. Por lo tanto, ASHRAE consideró necesario contar con una guía de consenso que se pueda utilizar para calcular ahorros normalizados que se ajusten a influencias que afectan el consumo de energía.

En general, la Guía 14-2002 aborda la determinación del ahorro de energía comparando las mediciones de uso de energía antes y después de la implementación de un ECM (Energy Conservation Measure), las cuales se ajustan por cambios no relacionados con la gestión energética que afectan el consumo de energía.

El método básico se muestra en la *Figura 1* e implica la proyección de patrones de uso de energía o demanda del período previo (línea base) en el período posterior a la implementación, como se indica en la línea discontinua que comienza inmediatamente después de la instalación de la ECM. Los ajustes típicos al uso de energía o demanda en la línea base incluyen el clima, la ocupación y las variables del sistema. El ahorro representa la cantidad de uso de energía entre la línea base proyectada y el consumo posterior a la renovación y se calcula utilizando la siguiente fórmula:

$$\text{Ahorro} = (\text{Uso de energía en la línea base proyectada a las condiciones posteriores a la ECM}) - (\text{Uso de energía o demanda posterior a la ECM}). \quad (1)$$

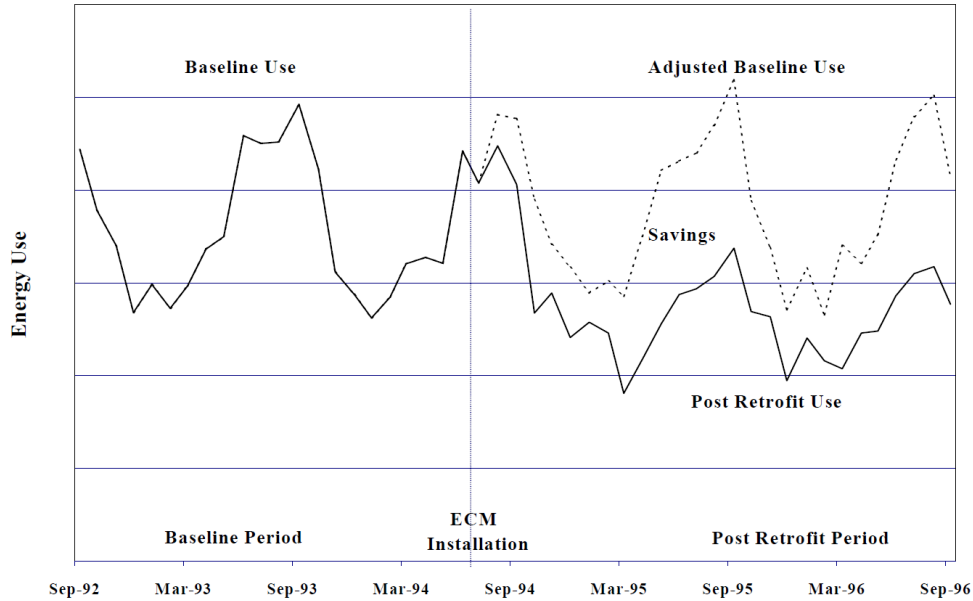


Figura 1 Método básico de la Guía ASHRAE para determinar ahorros.

Este documento a rasgos generales da idea al lector de todo el proceso de M&V, las técnicas de medición y calibración, la valoración del error obtenido, y la técnica de Modelos de Regresión Lineal. Por otro lado, no detalla específicamente la obtención de una línea base de forma concisa. Las técnicas presentadas están estrechamente relacionadas y respaldan las opciones proporcionadas en el IPMVP.

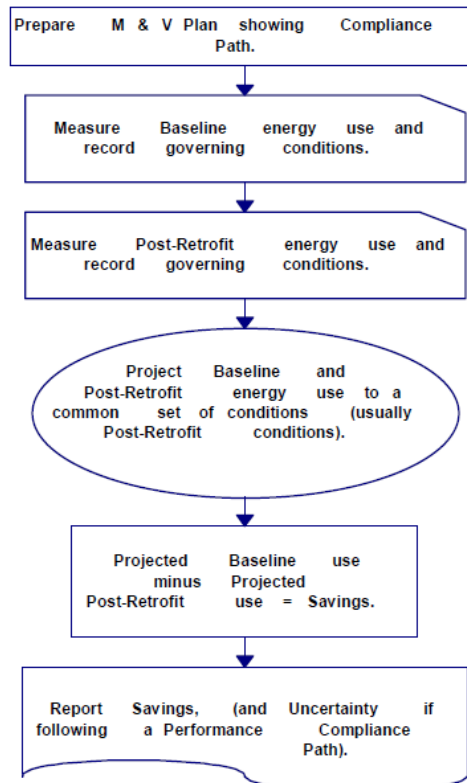


Figura 2 Esquema general de la Guía ASHRAE para la medición de ahorro de energía.

2.1.2 IPMVP. EVO

Protocolo Internacional de Medición y Verificación del Desempeño (IPMVP por sus siglas en inglés), desarrollado por Efficiency Valuation Organization (EVO por sus siglas en inglés) [3]. En el texto se explica el proceso de M&V tradicional y se proporcionan los fundamentos para aplicar el método en proyectos que buscan mejorar la eficiencia energética.

Las distintas etapas del plan de M&V que se detallan son las siguientes:

- Asignación de las responsabilidades y evaluación del riesgo del proyecto.
- Definición del alcance y medición de la situación inicial.
- Creación del modelo de línea base.
- Instalación de las medidas de ahorro energético.
- Medición del consumo post-implementación y evaluación de los ahorros.
- Realización de reportes periódicos y control

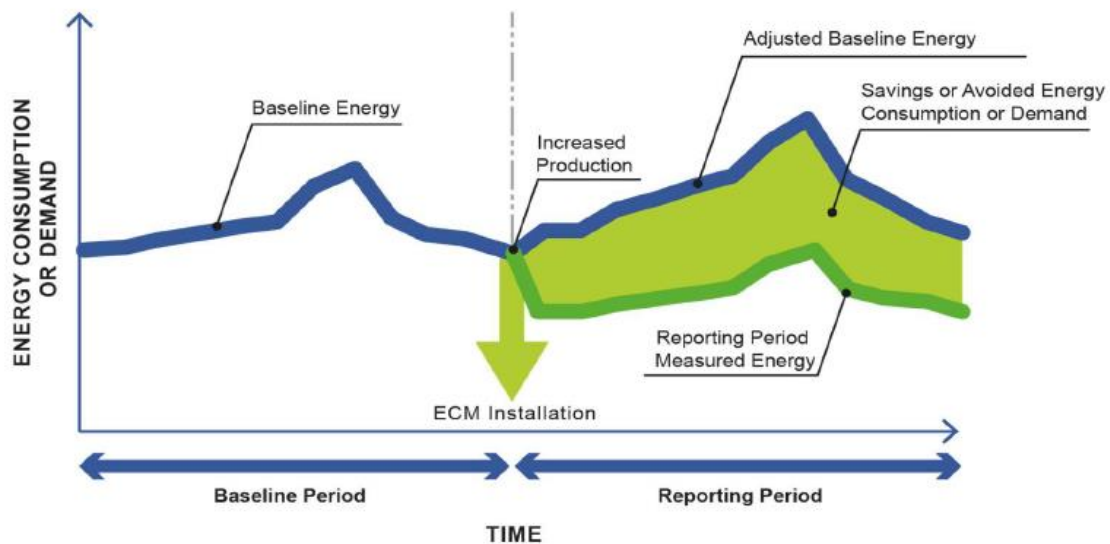


Figura 3 Construcción y uso de la línea base. Fuente: IPMVP, EVO.

El IPMVP distingue cuatro métodos de medida y verificación:

- A: Verificación aislada con medición de parámetros clave. Es una combinación de factores medidos y estimados. Las mediciones se realizan a corto plazo, de forma puntual o continua, y se puede tomar a nivel de componente o de sistema. Los coeficientes estimados se deberán sustentar a partir de datos históricos o de los fabricantes. Los ahorros se calculan a partir de cálculo de línea base y de información del uso de la energía en el periodo de obtención de los valores medidos y estimados.
- B: Verificación aislada con medición de todos los parámetros. Esta opción se basa en mediciones de líneas base y de reacondicionamiento energético. Al igual que en el caso anterior, las mediciones se realizarán a corto plazo de forma continua o puntual, a nivel de componente o sistema. Los ahorros se determinan a partir del análisis de línea base y el consumo de energía en un periodo representativo.
- C: Verificación de toda la instalación. Esta opción se fundamenta en la monitorización continua del consumo energético de toda una instalación. Por ello, el ahorro se obtiene mediante un análisis de la línea base y del consumo en el periodo actual. Así se deben

tener en cuenta variables independientes como lo son el clima y la ocupación. Esta opción requiere un inventario detallado de todos los equipos incluidos en las mediciones.

- D: Simulación calibrada. Consiste en el uso de un programa de simulación por ordenador para estimar el consumo energético de una instalación. Los modelos deben ser calibrados con datos reales de la instalación, ya sean horarios o mensuales. Dichas simulaciones deben incluir especificaciones de funcionamiento de los equipos, mediciones de consumo de componentes y los datos del medidor utilizado. Una vez calibrado el modelo, los ahorros se calculan comparando la simulación de línea base con una simulación del período de ejecución o bien con datos reales.

Para el caso de la evaluación integral de un edificio las opciones propias serían, o bien la opción C o bien la opción D.

2.1.3 DOE Uniform Methods Project

El Departamento de Energía de Estados Unidos (DOE), trabaja con un Programa Federal de Gestión de la Energía (FEMP por sus siglas en inglés) para desarrollar un conjunto de protocolos para determinar los ahorros derivados de medidas y programas de eficiencia energética.

Los protocolos de medida se basan en el IPMVP, estableciendo seis pasos:

- Asignar los riesgos y responsabilidades del proyecto.
- Desarrollar un plan de M&V del proyecto.
- Definición de la línea base.
- Instalación de equipos y sistemas.
- Medición del consumo post-implementación y evaluación de los ahorros.
- Realizar en un intervalo regular actividades de M&V.

Para definir la línea base, se requieren ciertas condiciones físicas, como el inventario de equipos, la ocupación, los horarios de operación de los equipos, los datos meteorológicos, etc. Estas características se obtienen mediante encuestas, mediciones e inspecciones. Es fundamental documentar todas las hipótesis que se hayan realizado y decidir qué necesita ser analizado y durante cuánto tiempo. Una vez obtenida la línea base, se puede ajustar y verificar según la precisión del método de M&V seleccionado. Al comparar el consumo obtenido por la línea base con el consumo posterior a la instalación, se pueden obtener los ahorros.

Según DOE, el cálculo de ahorros se realizaría de la siguiente forma:

$$\text{Ahorro} = (\text{Energía de la línea base} - \text{Energía posterior a la instalación}) \pm \text{Ajustes} \quad (2)$$

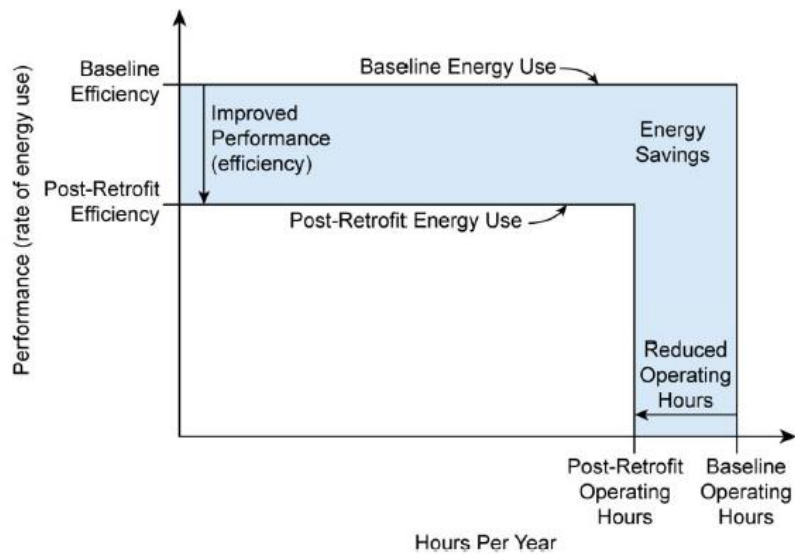


Figura 4 Ahorro en función del uso y desempeño. Fuente: IPMVP, EVO.

Los métodos contemplados en esta guía se basan en los contenidos de IPMVP de EVO, y son:

A: método más simple. La predicción del consumo se basará en un único parámetro clave (key parameter), el resto de los parámetros necesarios para la confección del modelo de línea base se obtendrán por aproximación o por datos históricos. El periodo de medición será corto y se realizarán mediciones periódicas o de forma continua. El ahorro se obtendrá por cálculos y estimaciones.

B: se medirán varios parámetros de forma aislada, en un breve periodo de tiempo y de forma continua o periódica, se obtendrá la línea base. Las mediciones se prolongarán tras la implantación de la ECM y se calculará el ahorro como la diferencia entre la estimación (tras ajustes si es necesario) menos la medición post-mejora.

C: se realizará una medición continua del consumo en un periodo de medición y post-mejora, se construirá una línea base con herramientas de regresión que dependerán de variables independientes. Es necesario conocimiento de las distintas influencias de las instalaciones, así como los equipos existentes y todo lo que afectará al consumo.

D: necesitará de la calibración de los modelos con los consumos reales de la instalación. Se requiere métodos de computación para el modelo y que éste contemple todas las variables influyentes en temas de equipos, perfiles de uso, rendimientos...

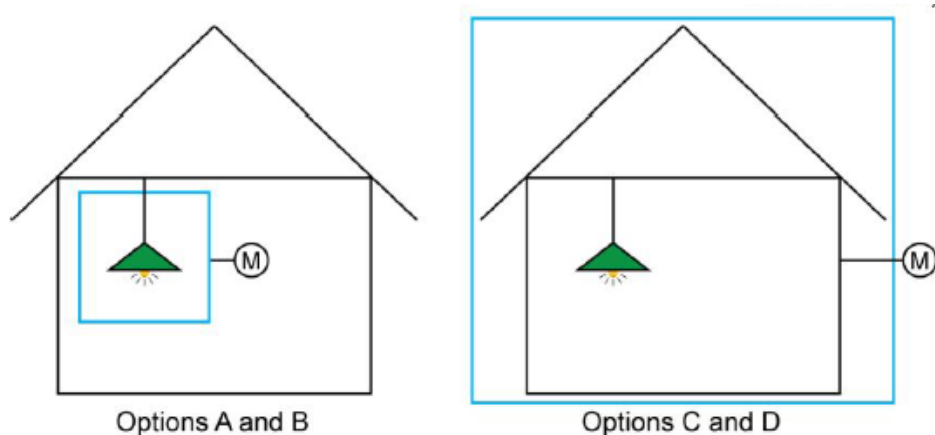


Figura 5 Métodos de M&V. Aislamiento de la actualización (A y B). Instalación entera (C y D) Fuente: IPMVP, EVO.

2.2 Normativa

2.2.1 UNE-EN ISO 50001:2018

ISO 50001 [4] es la norma internacional para los sistemas de gestión de la energía. Proporciona un marco para la eficiencia y la optimización de la energía y de ella se escinden el resto de las normas incluidas en este capítulo.

Su propósito es facilitar a las diversas organizaciones los sistemas y procesos necesarios para mejorar su política energética. Esta Norma Internacional es válida para cualquier entidad que busque garantizar el cumplimiento de su política energética declarada y que aspire a demostrar dicho cumplimiento a terceros. La conformidad puede ser verificada a través de una autoevaluación y autodeclaración de conformidad, o mediante la certificación del sistema de gestión de energía por parte de una entidad externa.

Este sistema permite a la organización cumplir con los compromisos derivados de su política energética, establecer objetivos, metas y planes de acción para mejorar su desempeño energético. Se fundamenta en el ciclo de mejora continua Planificar – Hacer – Verificar – Actuar

(PHVA), como se ilustra en la *Figura 6*. Esto conduce a un uso más eficiente de las fuentes de energía y a la reducción del impacto ambiental.

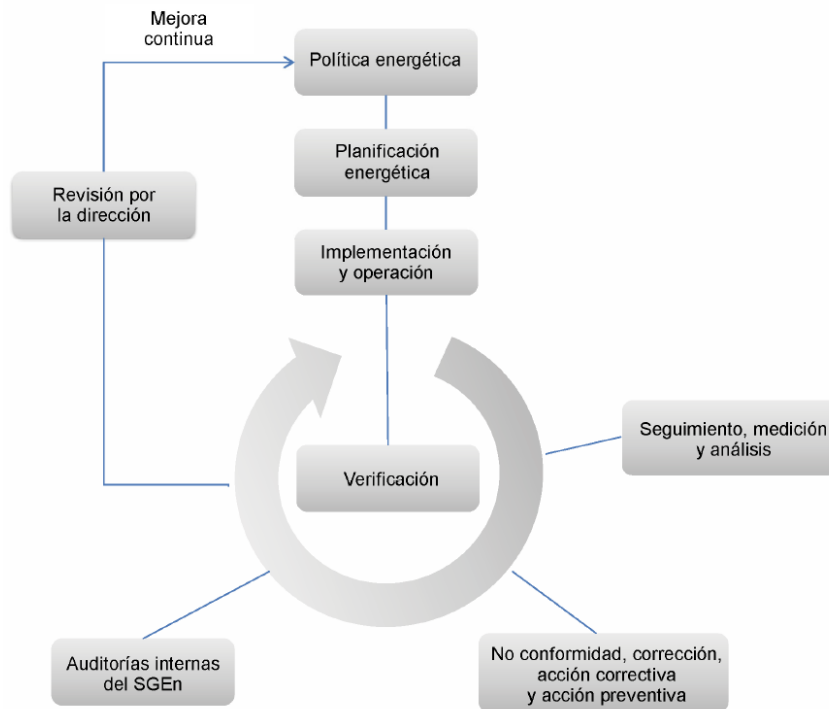


Figura 6 Modelo de sistema de gestión de la energía. Fuente: ISO 50001

2.2.1.1 Responsabilidad de la Dirección

La alta dirección debe liderar el SGE, asignar responsabilidades, integrar el sistema con los procesos organizativos y promover la mejora continua.

2.2.1.2 Política Energética

La organización debe establecer una política energética documentada que refleje el compromiso para alcanzar una mejora en el desempeño energético y que sea apropiada a la naturaleza de la organización.

2.2.1.3 Planificación Energética

La planificación energética debe ser coherente con la política energética y debe conducir a actividades que mejoren de forma continua el desempeño energético.

Para llevar a cabo una planificación energética, la organización debe realizar en primer lugar una revisión energética:

- a) analizar el uso y el consumo de la energía basándose en mediciones y otro tipo de datos,
- b) basándose en el análisis del uso y el consumo de la energía, identificar las áreas de uso significativo de la energía
- c) identificar, priorizar y registrar oportunidades para mejorar el desempeño energético.

En lo que respecta a las líneas de base energética, contempladas en la sección de Planificación energética según se muestra en el diagrama de la *Figura 7*, constituyen un requisito fundamental

para la certificación de la norma ISO 50001. La organización debe establecer estas líneas de base a partir de información derivada de revisiones energéticas previas y de la recopilación de datos sobre el uso y consumo de energía. Además, cualquier cambio significativo, ya sea en el proceso o en los patrones de operación, que afecte la eficiencia energética, debe ser evaluado en relación con dicha línea de base energética. También se requiere evaluar los cambios cuando así lo indique un método predeterminado o cuando la línea base no refleje adecuadamente el uso y consumo de energía de la organización.

La planificación energética también contempla la identificación de indicadores de desempeño energético (IDE) apropiados para realizar el seguimiento y la medición de su desempeño energético, así como el establecimiento de objetivos y metas energéticos y los plazos para su cumplimiento.

Los objetivos y metas deben ser coherentes con la política energética y las metas deben ser coherentes con los objetivos.

La organización debe establecer, implementar y mantener planes de acción para alcanzar sus objetivos y metas.

2.2.1.4 Implementación y Operación

La organización debe promover la competencia y toma de conciencia de aquellos que trabajen en relación a los usos significativos de la energía. La información acerca del desempeño energético debe ser comunicada internamente.

Los contenidos del SGE deben estar documentados, incluyendo:

- a) el alcance del SGE
- b) la política energética
- c) los objetivos energéticos, metas y planes de acción

La organización debe establecer criterios para la operación y mantenimiento de instalaciones, así como para la adquisición de servicios y productos de energía.

2.2.1.5 Verificación

La organización debe asegurar el seguimiento, medición y el análisis de las operaciones que determinan el desempeño energético, y de características clave tales como los IDEs.

Asimismo, debe llevar a cabo auditorías internas para asegurar que el SGE cumple con los requisitos legales y con los objetivos establecidos.

2.2.1.6 Revisión por la Dirección

La alta dirección debe realizar revisiones periódicas para asegurar la adecuación, eficacia y alineación estratégica del SGE, tomando decisiones informadas para la mejora continua.

2.2.2 ISO 50002:2014

La norma ISO 50002 [5] especifica los requisitos y el procedimiento para llevar a cabo una auditoría energética en relación con el rendimiento energético. Las líneas base se deben utilizar en el análisis de las mejoras del rendimiento energético de la organización. Es aplicable a todo tipo de organizaciones, formas de energía y su uso.

2.2.3 UNE-ISO 50003:2018

Esta norma [6] recoge los requisitos específicos para la competencia, consistencia e imparcialidad en la auditoría y la certificación de sistemas de gestión energéticos. Dichos sistemas de gestión energéticos determinan y ajustan líneas base con las que comparar los resultados para evaluar la eficiencia energética.

Esta norma se ocupa de las auditorías de los sistemas de gestión de la energía con fines de certificación, pero no trata de auditorías energéticas cuyo objetivo sea establecer un análisis sistemático del consumo de energía y el uso de la energía y que se definen en la Norma ISO 50002.

2.2.4 UNE-ISO 50004:2022

Este documento [7] proporciona directrices prácticas y ejemplos para establecer, implementar, mantener y mejorar un SGE de acuerdo con la Norma ISO 50001. Le muestra a la organización cómo adoptar un enfoque sistemático para lograr la mejora continua en el SGE y el desempeño energético.

La norma establece que la revisión energética proporciona la información necesaria para establecer una línea de base. El punto de partida es examinar las tendencias en el consumo de energía y las variables relevantes, y evaluar la disponibilidad de datos. Los datos disponibles, junto con el conocimiento de los procesos que consumen energía pueden indicar el tipo más apropiado de IDE. La LBE se puede utilizar para calcular el ahorro de energía y como referencia antes de la implementación de acciones de mejora del desempeño energético como se muestra en la *Figura 7*. Se debe utilizar el mismo IDE tanto para los períodos de línea de base como para el de informe con el fin de determinar la mejora del desempeño energético.

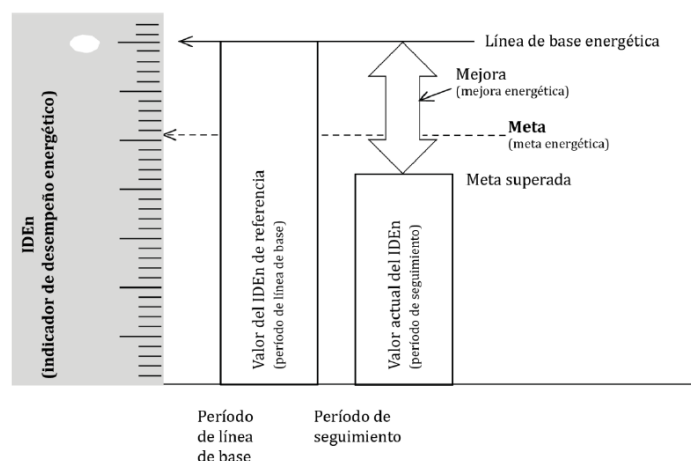


Figura 7 Indicadores de desempeño y Líneas base de Energía. Fuente: ISO 50004

2.2.5 ISO 50006:2014

La norma ISO 50006 [8] ofrece una guía a las organizaciones sobre el establecimiento, uso y mantenimiento de los Indicadores de Desempeño Energético (IDE) y las Líneas Base Energéticas (LBE) como componentes esenciales del proceso de evaluación de la eficiencia energética. Esta norma define que las LBE son puntos de referencia que caracterizan y cuantifican el rendimiento energético de una entidad durante un período específico. Dichas LBE también sirven para calcular los ahorros energéticos a partir de comparaciones entre referencias anteriores y posteriores a la implementación de mejoras. En la *Figura 7* se ilustra la relación entre las Líneas Base de Energía y la eficiencia energética.

El procedimiento detallado por esta norma para llevar a cabo una medición efectiva del desempeño energético se presenta en la *Figura 8*. Este proceso consta de cinco partes fundamentales:

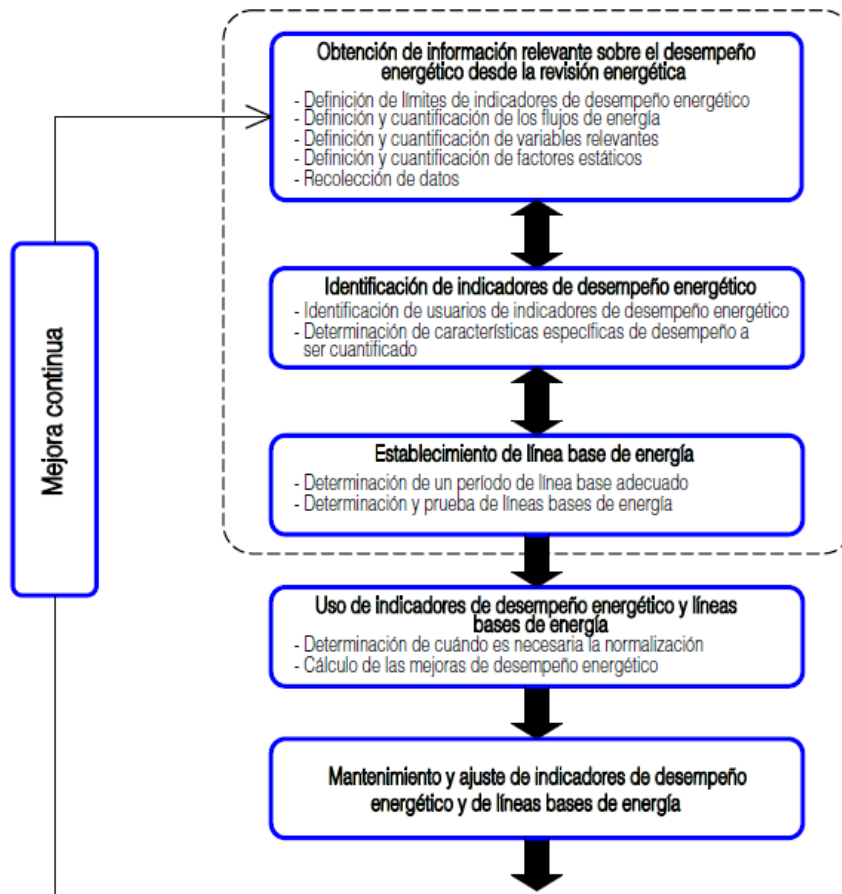


Figura 8 Visión general sobre la medición de la eficiencia energética. Fuente: ISO 50006

2.2.5.1 Obtención de información relevante sobre el desempeño energético a partir de la revisión energética.

Antes de comentar el proyecto de evaluación, será necesario analizar evaluaciones anteriores en el caso en el que las hubiere, marcar el alcance del proyecto actual y definir el límite de las IDE a utilizar.

Al definir los límites de los indicadores se debe tener en consideración:

- Las responsabilidades organizativas en relación con la gestión de la energía,
- La facilidad de aislar el límite de los indicadores mediante mediciones de la energía y de variables relevantes.
- Los límites de los Sistemas de Gestión de Energía (SGE)
- El uso significativo de la energía o grupo de usos que la organización designa como prioridad para controlar y mejorar.
- Equipos y procesos que la administración quiera aislar.

Por último se ha de hacer una recolección de datos. Los datos que reunir han de ser especificados por la entidad para cada IDE y su correspondiente LBE. La fuente de energía se debería especificar junto con las variables relevantes. La recogida de datos será periódica y el organismo seleccionará la frecuencia con la que se realizará dicha recolección. Las medidas tomadas y calculadas utilizarán datos recogidos en un periodo de tiempo específico.

2.2.5.2 Identificación de indicadores de desempeño energético.

IDE: parámetro clave de un equipo, instalación o edificio completo que proporciona información relevante sobre el desempeño energético que proveerá al analista una imagen relevante de la situación.

En la *Figura 9*, extraída de la norma, se muestra el proceso de selección de aquellas variables que podrían formar parte del conjunto óptimo de las mismas.

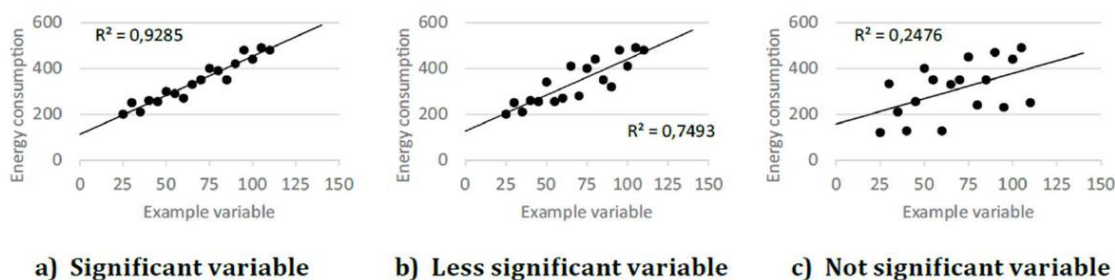


Figura 9 Relevancia de variables según ISO 50006

Las organizaciones definen metas para el desempeño energético como parte del proceso de planificación energética de sus SGE. Las metas de desempeño energético se deberían caracterizar con valores de IDE. Cuando los IDEs se comparan en el tiempo, deberían permitir a una organización determinar si el desempeño energético ha cambiado y si se están alcanzando con sus metas.

2.2.5.3 Establecimiento de líneas de base energéticas.

La Figura 10 muestra cómo una organización puede evaluar los cambios en el desempeño energético entre distintos períodos. La LBE se utiliza para el cálculo del ahorro de energía, como referencia antes y después de la implementación de acciones de mejora energética.

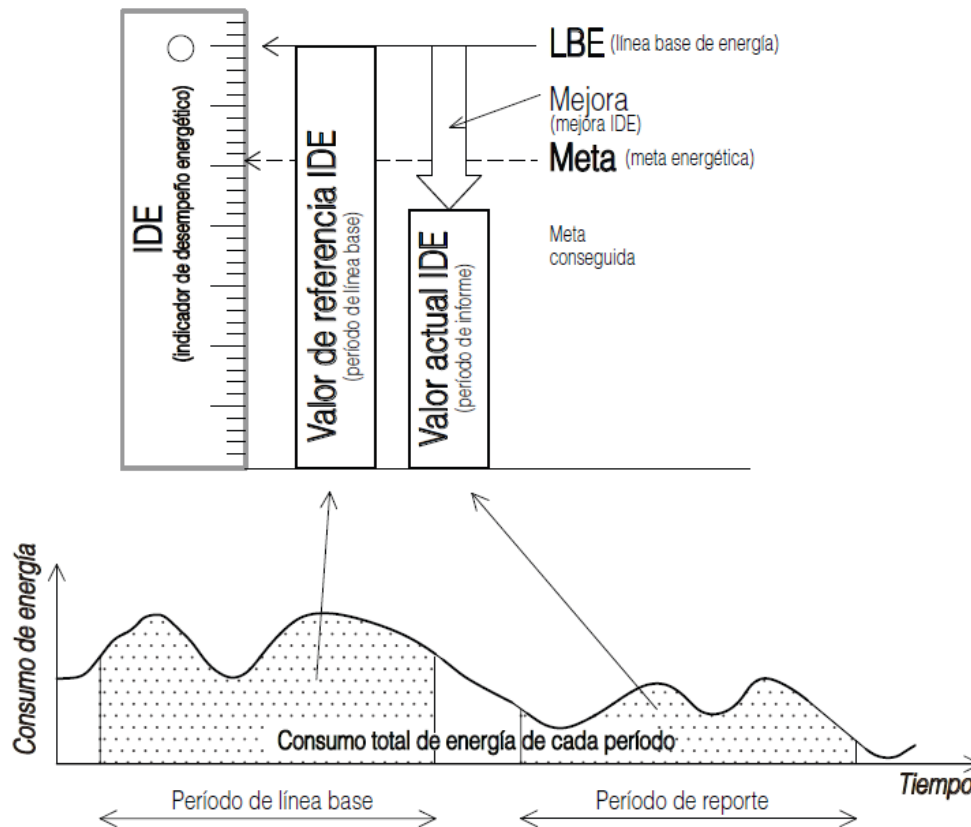


Figura 10 Conceptos de período de línea base y período de informe de un IDE. Fuente: ISO 50006

La LBE se define por el valor del IDE durante el periodo de referencia de la línea base. Una comparación entre la LBE e IDEs del período de informe se puede utilizar para ilustrar el progreso hacia el cumplimiento de los objetivos energéticos y objetivos de energía y demostrar las mejoras en el desempeño energético.

2.2.5.4 Uso de los indicadores de desempeño y líneas base de energía.

Es fundamental determinar cuándo se requiere normalización. La comparación directa del consumo de energía con los períodos de referencia y de notificación (mediante un método no normalizado) es válida únicamente si no se producen cambios sustanciales. Para llevar a cabo la normalización, se pueden emplear los siguientes enfoques:

En situaciones con una carga base pequeña y una única variable relevante, se puede establecer una relación sencilla entre la energía consumida y esa variable significativa.

En casos de carga base grande o varias variables relevantes, se puede emplear un modelo que describa dicha relación.

Durante el periodo de informe, se presentarán los resultados obtenidos al comparar la situación real con los cálculos realizados mediante las líneas base. Esto posibilitará la identificación de las discrepancias en términos absolutos, ratios o porcentajes entre una situación estimada a través de experiencias anteriores y la situación real.

2.2.5.5 Mantenimiento y ajuste de indicadores de desempeño y de líneas base de energía.

La organización debe verificar la idoneidad continua de los IDE y LBE, ya que los cambios en instalaciones, procesos o sistemas pueden afectar el uso de energía, el consumo y otras variables. Se emplean diversas pruebas

Para determinar la validez de los IDE y LBE se realiza una comparación entre los valores de la línea base y las condiciones del período de informe para evaluar si están dentro de un rango estadísticamente válido. También se identifican cambios significativos en factores estáticos.

En caso de que los valores ya no sean válidos, se pueden ajustar cambiando el período de línea base a un intervalo de tiempo diferente. Como alternativa, se pueden realizar ajustes mediante métodos diferentes:

1. Se utiliza la información del período de informe para desarrollar un modelo estadístico, luego se calcula el rendimiento utilizando los datos actuales de la línea base (Backcasting).
2. Se emplean datos basados en condiciones estándar para desarrollar un modelo estadístico, luego se calcula el rendimiento con los datos actuales de energía y variables relevantes de la línea base y el período de informe.

2.2.6 ISO 50015:2014

Esta Norma Internacional [9] establece un conjunto de principios y directrices para el proceso de medición y verificación (M&V) del rendimiento energético de una organización o sus componentes. Los M&V tienen como finalidad proporcionar confianza a las partes interesadas sobre los resultados. Deben seguirse los siguientes principios:

1. La exactitud y la gestión de la incertidumbre apropiada: La incertidumbre de los resultados debe ser administrada a un nivel apropiado para el propósito de la M&V.
2. La transparencia y la reproducibilidad del proceso de M&V: Un proceso M&V debe ser documentado para garantizar la transparencia y la trazabilidad del proceso.
3. La gestión de datos y la planificación de mediciones: La gestión de datos incluye los medios para almacenar, mantener y asegurar los datos.
4. La competencia del profesional de M&V.
5. La imparcialidad del profesional de M&V.
6. La confidencialidad: cualquier información confidencial necesaria para llevar a cabo la M&V debe ser accesible al profesional que la lleva a cabo.
7. El uso de métodos apropiados: la selección del método de cálculo y método de M&V estarán establecidos en el plan de M&V.

2.2.6.1.1 Plan de medición y verificación

Existen seis pasos fundamentales del proceso especificados en el plan de M&V (véase Figura 11):

1. Establecer y documentar el plan de M&V detallando cada una de las fases.
2. Recogida de datos.
3. Verificar la implementación de la acción de mejora del desempeño energético.
4. Realizar el análisis de M&V.
5. Informe de resultados y emisión de documentación.
6. Revisar la necesidad de repetir el proceso.

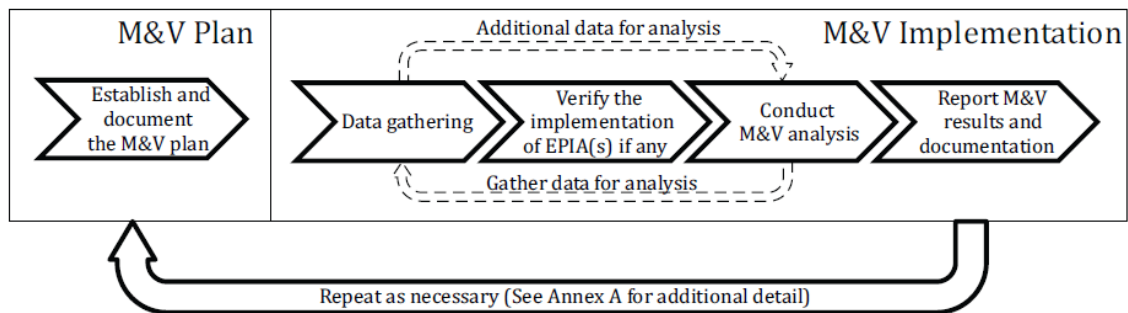


Figura 11 Pasos fundamentales en el proceso de M&V. Fuente: ISO 50015

2.2.6.1.2 Establecimiento y ajuste de líneas base

El papel de las LBE es fundamental en varias partes del proceso de M&V, como es la descripción de las acciones de mejora del desempeño energético, la elección de los límites y análisis preliminar del plan de M&V, y el análisis de sus resultados.

Las líneas base deben ser establecidas antes de aplicar cualquier medida de ahorro, salvo que estén disponibles los datos para obtener dicha línea base. Se documentará el establecimiento de las LBE incluyendo la siguiente información:

- Los datos brutos utilizados para obtener la línea base.
- El período de tiempo específico utilizado con las condiciones que implique.
- El proceso seguido.
- Los datos procesados.

El método de M&V puede requerir un ajuste de la línea base. El plan de M&V debe incluir las condiciones y razones por las que dicho ajuste es necesario y el procedimiento a seguir para realizarlos.

3 ADECUACIÓN DEL PLAN ESTRATÉGICO DE ENERGÍA Y CLIMA DEL AYUNTAMIENTO DE ZARAGOZA A LA NORMATIVA

En esta sección se van a repasar los contenidos más importantes del Plan Estratégico de Energía y Clima del Ayuntamiento de Zaragoza 2021-2030 (PEECAZ), en relación con la normativa en sistemas de gestión de la energía (SGE) comentada en el apartado anterior.

En sus líneas, el PEECAZ describe un plan estratégico a largo plazo (10 años) que afecta a toda la infraestructura e instalaciones gestionadas por la Unidad de Energía e instalaciones del Ayuntamiento de Zaragoza, incluyendo los **820 equipamientos** (edificios administrativos, culturales, centros deportivos, etc.) así como las **redes y servicios** (alumbrado, etc.), siendo **2083** el total de **contratos energéticos** gestionados por esta administración.

En sus primeras líneas, establece la estructura general del plan, que consiste en 5 fases: **estrategia, inventario, diagnóstico, plan de acción y seguimiento**. Por otro lado, de la normativa expuesta en apartados anteriores se extraen los requisitos más importantes que debe cumplir el SGE de la entidad para ser certificable según la normativa ISO 50001 [4]. El enfoque adoptado para este bloque consiste en seguir la estructura de la mencionada norma, relacionando en cada apartado los contenidos del PEECAZ que aluden a ella y valorando su adecuación.

3.1 Política energética

Se debe establecer y documentar una política que refleje el compromiso de la organización con la mejora continua del desempeño energético.

En la fase **estrategia** queda definida y contextualizada la **Política energética** que rige el ayuntamiento, y con la cual deben estar en consonancia el resto de los contenidos del documento. El PEECAZ se desarrolla siguiendo la línea del Plan Nacional Integrado de Energía y Clima (PNIEC) con el fin de cumplir los objetivos marcados por este último.

En este contexto, se definen las cinco principales líneas de actuación en las que se divide la política energética del Ayuntamiento:

- Descarbonización. Que España pueda ser un país neutro en carbono para el horizonte temporal de 2050. En el que se consigan cero emisiones netas de GEI.
- Eficiencia Energética. Se plantea una mejora de la eficiencia en la energía primaria del 39,5% para el horizonte temporal de 2030.
- Seguridad Energética. Entendida como la seguridad de suministro, busca garantizar el acceso a los recursos necesarios para asegurar la diversificación del mix energético nacional, reducir la dependencia, fomentar el uso de fuentes autóctonas y suministrar energía segura, limpia y eficiente.
- Dimensión del mercado interior de la energía. Esta línea de actuación tiene como objetivo el conseguir un mercado energético más competitivo, transparente y flexible.
- Investigación, Innovación y Competitividad. El objetivo se centra en alinear las políticas a nivel nacional con los objetivos establecidos en el ámbito internacional.

Esta política energética parece adecuada a los requisitos expuestos en la norma ISO 5001:2011 apartado 4.3, puesto que deja constancia documental del compromiso de la organización con una mejora continua del desempeño energético.

3.2 Planificación energética

Se requiere una evaluación energética inicial y la identificación de aspectos energéticos significativos. Además, se debe establecer un plan de acción para lograr mejoras continuas.



Figura 12 Proceso de planificación energética ampliado. Fuente: AENOR

En las fases de **inventario** y **diagnóstico** se define la situación energética actual del ayuntamiento. En estas líneas del documento encontramos en primer lugar un Inventario de Emisiones de Referencia (IER) partiendo del año 2015 hasta el año 2019 (el 2020 quedó descartado por la influencia de la pandemia en los consumos energéticos).

Aludiendo a lo expuesto en la norma ISO 5001:2011 apartado 4.4.3, “La organización debe desarrollar, registrar y mantener una revisión energética. La metodología y el criterio utilizados para desarrollar la revisión energética deben estar documentados.”. De modo que la revisión estaría incompleta sin un mantenimiento de la misma. Por ello, el PEECAZ define la estructura y contenidos de los **Informes energéticos anuales** que se encarga de redactar la unidad de energía e instalaciones, y en los que se lleva a cabo el seguimiento del plan de acción.

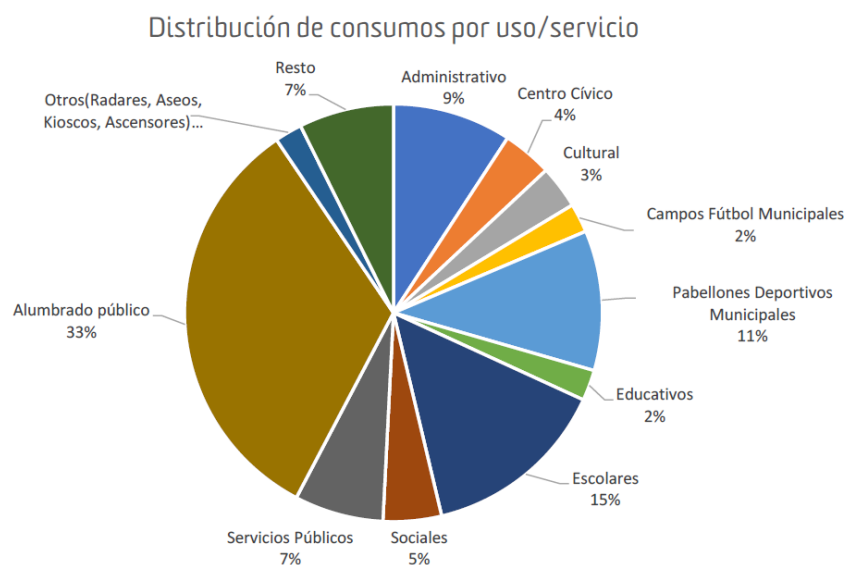


Figura 13 Distribución de consumos por uso, año 2019. Fuente: PEECAZ

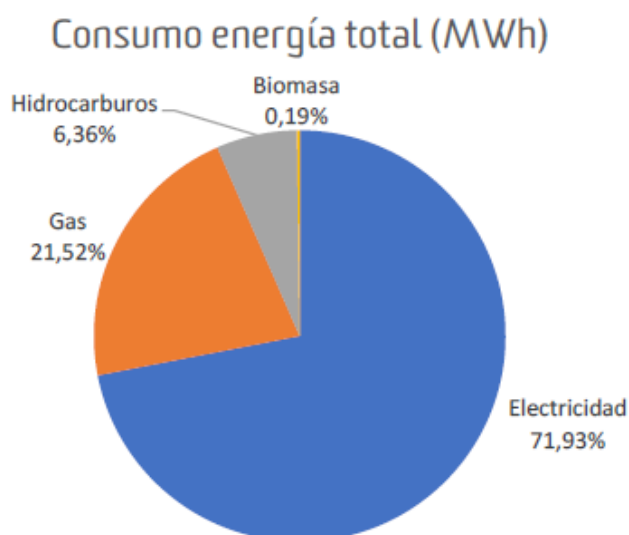


Figura 14 Fuentes principales de energía, año 2019. Fuente: PEECAZ

	2015	2016	2017	2018	2019
Consumo electricidad por m2	33,87	33,09	32,78	32,54	31,92
Consumo gas natural por m2	42,81	35,57	41,38	37,61	37,98
Consumo hidrocarburos por m2	56,37	46,33	45,83	46,53	42,37
Consumo biomasa por m2	0,00	0,00	0,00	0,00	30,56
Energía total por m2	39	35	37	36	35

Figura 15 Evolución indicadores de desempeño energético equipamientos (kWh/m2). Fuente: PEECAZ

En cuanto a las tendencias en los consumos y la manera en la que se abordan desde el PEECAZ, es importante tener en cuenta el gran número de equipamientos existentes, que obliga a establecer niveles de prioridad en cuanto a lo meticoloso del análisis. Esto está contemplado en la normativa ISO 50001, apartado planificación, punto 4.4.3 Revisión energética “basándose en el análisis del uso y el consumo de la energía, identificar las áreas de uso significativo de la energía, es decir, identificar las instalaciones, equipamiento, sistemas, procesos y personal que trabaja para, o en nombre de, la organización que afecten significativamente al uso y al consumo de la energía”.

Estos usos significativos de la energía se corresponden con los Equipamientos singulares contemplados en el PEECAZ, que son aquellos donde se pretende realizar un seguimiento más en detalle del consumo energético generando para ello **líneas base energéticas (LBE)** de cada uno de estos edificios.

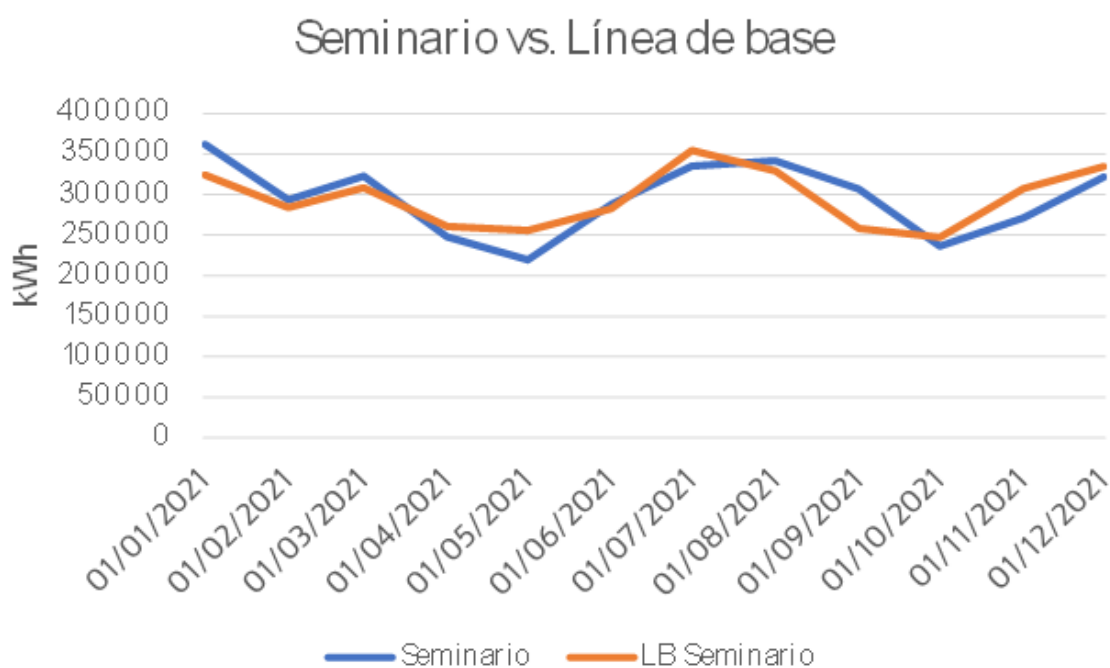


Figura 16 Consumos mensuales Edificio Seminario y Línea Base, 2021. Fuente: PEECAZ

Para el resto de los equipamientos el seguimiento de la tendencia de consumo se limitará a clasificarlos en primer lugar por tipo de equipamiento para poder comparar entre edificios de usos similares, para a continuación asignarles una calificación en función de su desempeño.

La calificación consiste en una letra que puede ir acompañada por un símbolo + o -. La letra hace referencia al cuartil en el que se encuentra el equipamiento dentro de su categoría en cuanto al **indicador de desempeño energético (IDE)** seleccionado, en este caso consumo por unidad de superficie. El símbolo + o - es un indicador de tendencia. Por ejemplo, el equipamiento CASA CONSISTORIAL obtiene en 2020 la calificación **B-**, indicando que su consumo de 367 kWh/m² se encuentra en el tercer percentil entre los edificios de tipo administrativo (por encima del 50% de los equipamientos pero sin alcanzar a aquellos situados en el top 25%), y que su consumo por unidad de superficie ha aumentado con respecto a la media de los dos años anteriores.

La fase del PEECAZ **plan de acción** define los ejes de actuación en los que se engloba el conjunto de objetivos a alcanzar por el plan:

Promoción y desarrollo de energías renovables. Se dirige principalmente a las actuaciones en términos de generación eléctrica y térmica, para contribuir al objetivo nacional de integración de renovables de un 42% de la energía final consumida para el 2030 fijado en el PNIEC 2021 - 2030.

Ahorro y uso eficiente de la energía para contribuir activamente en el objetivo de mejora del 39,5% de la eficiencia energética, así como en la reducción del 23% de las emisiones de gases efecto invernadero respecto a los niveles de 1990.

Optimización de infraestructuras: contempla la renovación de infraestructuras existentes del parque edificatorio público, así como la promoción de la movilidad sostenible.

Medidas transversales: Aquí se contemplan otras medidas que promocionan la innovación, así como la difusión y formación de personal.

El PEECAZ contiene en estas secciones la evaluación energética inicial y el procedimiento para la realización de las revisiones energéticas periódicas. También establece los indicadores de desempeño y el uso que se va a dar a los mismos, para la consecución de unos objetivos que son coherentes con la política energética.

3.3 Implementación y operación

La manera de abordar los objetivos propuestos está definida en la normativa ISO 50001, apartado planificación, punto 4.4.6 Objetivos energéticos, metas energéticas y planes de acción para la gestión de la energía [4], "La organización debe establecer, implementar y mantener objetivos energéticos y metas energéticas documentados correspondientes a las funciones, niveles, procesos o instalaciones pertinentes dentro de la organización. Deben establecerse plazos para el logro de los objetivos y metas. Los objetivos y metas deben ser coherentes con la política energética. Las metas deben ser coherentes con los objetivos."

What will be done?	What resources will be required	Who will be responsible?	When will it be completed?	How will the results be evaluated?

Figura 17 Tabla de requisitos por objetivo, Fuente: NQA

Una manera efectiva de cumplir con los requisitos de la norma y de implementar un "Plan de acción" para la gestión de objetivos y metas es elaborar una tabla que represente estos aspectos. Atendiendo a la *Figura 17* mostrada anteriormente y tomándola como ejemplo, se ha

confeccionado una tabla resumen que incluye las 25 medidas contempladas en el PEECAZ, y la información disponible de cada una que se puede ver en *Tabla 1*.

Cada fila contiene la información de una medida del plan de acción, incluyendo una breve descripción de esta, la inversión anual que se ha de destinar a su implementación, el ahorro energético, económico y de emisiones anual asociado y, si procede, los indicadores clave para su seguimiento así como la unidad en la que se miden. La fecha de implementación de estas medidas se sitúa en el horizonte temporal de 2030.

Las 25 medidas están asociadas a cada uno de los 4 ejes de actuación definidos en el plan de acción:

Promoción y desarrollo de energías renovables: Nos encontramos con medidas relacionadas con la implantación de instalaciones de generación renovable, cuyo seguimiento se basa principalmente en los kWh generados o kWp instalados como indicador. También en este eje de actuación se incluye la medida de crear anualmente una comunidad energética en la que participen 20 viviendas como mínimo. Por último, existen medidas relacionadas con la contratación de energía de origen renovable, cuyo grado de cumplimiento se mide en toneladas de CO2 evitadas.

Ahorro y uso eficiente de la energía: Algunas de las medidas incluidas en esta sección tienen que ver con el seguimiento de los sistemas de monitorización energética en los equipamientos para el análisis continuo de consumos energéticos. Se esperan unos ahorros medibles en kWh y en toneladas de CO2 evitadas. Otras medidas incluyen la realización de campañas de sensibilización en el uso eficiente de la energía tanto para técnicos como para usuarios.

Optimización de infraestructuras: El eje de actuación más extenso, incluyendo un total de 10 medidas. Todas las medidas incluidas en esta sección tienen un impacto directo en el consumo energético medible en kWh o en toneladas de CO2. Algunos ejemplos: Renovación de calderas y sistemas de refrigeración, sustitución de alumbrado ineficiente, mejora de aislamientos y envolventes térmicas, optimización de la potencia contratada y electrificación de la flota municipal de vehículos. Las medidas incluidas en este eje de actuación suponen anualmente una inversión de 6.8M€, y un ahorro de energía de 5.2GWh.

Medidas transversales: Contemplan la realización de campañas y programas de formación en materia de uso eficiente de la energía. Su impacto no está cuantificado.

Los objetivos planteados están correctamente documentados en las 25 medidas que contiene el PEECAZ, y cumplen con los requisitos establecidos en la normativa quedando definidos su fecha de implementación, recursos necesarios, personas responsables y siendo todos ellos coherentes con la política energética expuesta en el mismo documento.

Tabla 1 Medidas expuestas en el PEECAZ

LÍNEA ESTRATÉGICA	CÓDIGO	ACCIONES	MEDIDAS	FECHA IMPLEMENTACIÓN	INVERSIÓN ANUAL (€)	AHORRO ENERGÉTICO ANUAL (kWh)	EMISIONES CO2 EVITADAS (TCo2/año)	PRODUCCIÓN DE ENERGÍAS RENOVABLES ANUAL (kWh)	AHORRO ECONÓMICO ANUAL (€)	INDICADORES SEGUIMIENTO	UNIDAD
Promoción y desarrollo de energías renovables	1.1	Implantación o renovación de instalaciones solares térmicas en los edificios municipales de mayor consumo de ACS.	Aumentar 100 m2 al año la superficie de captación a través de instalaciones solares térmicas.	2030	22.000		16,39	65.020	5.656,74	m2 instalados y aporte energético anual.	m2, kWh, TnCo2
	1.2	Implantación o renovación de instalaciones solares fotovoltaicas en equipamientos de mayor consumo eléctrico.	En 2030 tener completa la capacidad máxima de las cubiertas con instalaciones solares fotovoltaicas (8.183 kWp). Objetivo instalar 818,3 kWp año.	2030	654.640		379,3	1.145.790	183.326	Aumento anual de potencia instalada en kWp y aumento de la generación energética anual.	kWp, kWh
	1.3	Contratación pública de energía renovable con un mínimo del 50% del suministro con garantía de origen.	Contratar el 50% del suministro energético con garantía de origen renovable.	2030			7.587,81			Emisiones evitadas con la contratación de energía renovable.	TnCo2
	1.4	Contratación bilateral (PPA) con energía eléctrica renovable para una curva de carga del 60%.	Contratar un acuerdo bilateral de energía eléctrica renovable para una curva de carga del 60%.	2030			22.763,40			Emisiones evitadas con la contratación de energía renovable.	TnCo2
	1.5	Desarrollo de comunidades energéticas locales (autoconsumo compartido). Medidas de fomento a nivel local y municipal del autoconsumo. Lucha contra la pobreza energética de Administraciones Públicas.	Desarrollar una comunidad energética al año que incluya como mínimo un total 20 viviendas participantes.	2030	8.000		4,6	14.000	2.240		
	1.6	Implementación de instalaciones district heating a nivel de instalaciones locales municipales.	Instalación en 2030 de 6 MW de potencia térmica. Instalación potencia anual de 600 kW térmicos, tanto para calefacción como para refrigeración.	2030	157.143		435,4	1.400.000	17.800	Energía anual generada	kWh
Ahorro y uso eficiente de la energía	2.1	Seguimiento y verificación de los sistemas de monitorización energética en equipamientos.	Análisis continuo de los consumos energéticos para identificación de anomalías.	2030		318.690	105,49		50.990,40	Energía ahorrada y emisiones evitadas	kWh y TnCo2 evitadas
	2.2	Seguimiento y verificación de los sistemas de monitorización energética en instalaciones de generación por fuente de energía renovable.	Análisis continuo de los consumos energéticos para identificación de anomalías.	2030		12.376,40	4,10		1.980,22	Energía ahorrada y emisiones evitadas	kWh y TnCo2 evitadas
	2.3	Campaña de sensibilización del uso eficiente de la energía a los técnicos de los equipamientos.	Realizar una campaña anual.	2030	3.000					1 jornada anual	
	2.4	Campaña de sensibilización del uso eficiente de la energía a los usuarios de los equipamientos.	Realizar una campaña anual.	2030	3.000					1 jornada anual	
	2.5	Contratos de mantenimiento integral con incorporación de medidas de eficiencia energética.	Todos los contratos de mantenimiento llevarán incorporados la aplicación y desarrollo de medidas de eficiencia energética	2030						Ahorro energía objetivo del 1% con respecto al consumo total en 2019	
	2.6	Proveedor de servicios de balance del sistema eléctrico como figura del agregador independiente (AI).	Realizar prueba piloto en edificio Seminario.	2030							
Optimización de infraestructuras	3.1	Renovación de calderas y sistemas de refrigeración más antiguos e ineficientes con las mejores tecnologías en materia de eficiencia energética.	Reducir un 2% anual el consumo de sistemas de calefacción y refrigeración.	2030	241.695	154.644,96	48,09	13.454,11	241.695	Energía ahorrada y emisiones evitadas	kWh y TnCo2 evitadas
	3.2	Reforzar los aislamientos de conductos e instalar sistemas de regulación de los sistemas de climatización y ACS.	Reducir un 2% anual el consumo de sistemas de climatización y ACS.	2030	52.899	33.846,84	8,53		2.944,68	Energía ahorrada y emisiones evitadas	kWh y TnCo2 evitadas
	3.3	Sustitución de alumbrado ineficiente en equipamientos e incorporación de sistemas de control.	Reducir un 16% anual el consumo de equipamientos en 2030. Reducción anual de 858.384 kWh.	2030	103.006	858.384	284		137.341,44	Energía ahorrada y emisiones evitadas	kWh y TnCo2 evitadas
	3.4	Sustitución de alumbrado ineficiente en alumbrado público e incorporación de sistemas de control.	Reducir un 50% el consumo en alumbrado público en 2030. Reducción anual de 2.626.900 kWh.	2030	4.200.000	2.626.900	869,5	420.304		Energía ahorrada y emisiones evitadas	kWh y TnCo2 evitadas
	3.5	Mejorar las envolventes térmicas de los edificios existentes e incorporar medidas bioclimáticas, ventilación natural y protecciones solares.	Reducir un 2% el consumo de gas natural en 2030. Reducción anual de 171.440 kWh.	2030	267.944	171.440	43,2		14.915,28	Energía ahorrada y emisiones evitadas	kWh y TnCo2 evitadas
	3.6	Auditoría energética, certificación energética de edificios/instalaciones municipales y acciones para la mejora de la calificación.	Realización de Auditorías Energéticas y Certificaciones Energéticas a todos los equipamientos en 2030.	2030	297.500	478.035	158	41.589,05			
	3.7	Instalación de puntos de recarga de vehículo eléctrico.	Instalar 20 puntos de recarga al año.	2030	220.000	584.000	165		82.521,74	Nº puntos de recarga. Energía ahorrada en kWh. TnCo2 evitadas.	Ud, kWh y TnCo2 evitadas
	3.8	Renovación de la flota municipal de vehículos.	Renovar 40 vehículos al año por vehículo eléctrico.	2030	1.424.000	467.200	132		66.017,39	Nº puntos de coches eléctricos, energía ahorrada en kWh. TnCo2 evitadas.	Ud, kWh y TnCo2 evitadas
	3.9	Optimización de la potencia contratada en todos los puntos de suministro con la aplicación de los nuevos peajes.	Ajustar la potencia contratada en todos los puntos de suministro en función del perfil de consumo.	2030					50.000	Ahorro económico anual	€
	3.10	Control y compensación de las energías reactivas (inductivas y capacitivas).	Eliminar el coste por energía reactiva en aquellos puntos que sea factible su compensación.	2030					4.000	Ahorro económico anual	€
Medidas transversales	4.1	Contratación de productos y servicios aplicando criterios de eficiencia energética, emisiones de CO2 e impulso de energías renovables.	En toda contratación de productos y servicios prevalecerá el criterio de eficiencia energética, emisiones de CO2 e impulso de energías renovables.	2030						Nº de contratos	Ud
	4.2	Programa de formación continua dirigido al personal técnico municipal en materia de uso eficiente de las instalaciones energéticas de los edificios públicos.	Realizar una campaña anual.	2030						Nº de jornadas	Ud
	4.3	Promover los medios de transporte más eficientes y menos contaminantes dentro de la plantilla de instalaciones e infraestructuras.	Realizar una campaña anual.	2030						Nº de jornadas	Ud

3.4 Verificación

3.4.1 Seguimiento y medición

Se deben establecer procedimientos para realizar evaluaciones periódicas del desempeño energético, teniendo en cuenta los resultados de la medición y la verificación, para determinar la eficacia del sistema y la necesidad de mejoras. Esto incluye la medición de parámetros relevantes y la recopilación de datos para evaluar la eficacia del sistema de gestión de la energía.

De acuerdo con lo expuesto en la normativa ISO 50001, apartado verificación, punto 4.6.1, **Seguimiento, medición y análisis**, “La organización debe asegurar que las características clave de sus operaciones que determinan el desempeño energético se sigan, se midan y se analicen a intervalos planificados. Las características clave deben incluir como mínimo:

- Los usos significativos de la energía y otros elementos resultantes de la revisión energética.
- Las variables pertinentes relacionadas con los usos significativos de la energía.
- Los IDE.
- La eficacia de los planes de acción para alcanzar los objetivos y las metas.
- La evaluación del consumo energético real contra el esperado.
- Los resultados del seguimiento y medición de las características principales deben registrarse.”

En la Ley 18/2014, de 15 de octubre, de aprobación de medidas urgentes para el crecimiento, la competitividad y la eficiencia y posteriormente el Real Decreto 36/2023, de 24 de enero, se establece un sistema de **Certificados de Ahorro Energético** (CAE). Un CAE es un documento electrónico que garantiza que, tras llevar a cabo una actuación de eficiencia energética, se ha conseguido un nuevo ahorro de energía final equivalente a 1 kWh. De esta forma, si se acomete una actuación que implica un nuevo ahorro anual de 500 kWh, se podrán obtener 500 CAE. Este instrumento permite recuperar parte del coste de las inversiones en eficiencia energética (cambio de iluminación, mejora del aislamiento térmico, renovación de equipos industriales o domésticos, etc.), ya que el usuario final podrá recibir una contraprestación siempre que se validen los ahorros obtenidos para su posterior certificación mediante el Sistema de CAE. La creación de este sistema de certificación pone de manifiesto la importancia de la correcta implementación de LBEs.

La gran mayoría de los equipos consumidores de energía situados en los distintos equipamientos no tienen su consumo monitorizado, de modo que se desconoce el impacto de las distintas máquinas en el consumo total de los edificios. La monitorización de estos equipos es un proyecto que está llevando a cabo la unidad de energía e instalaciones actualmente, sin embargo, el elevado número de elementos consumidores de energía a considerar entre los 820 equipamientos junto con la escasez de recursos destinados a tal fin hace de éste un proyecto a largo plazo. De la calidad y cantidad de estos datos de consumo depende la precisión de las predicciones que se pueden extraer de ellos.

El seguimiento del consumo energético definido en el PEECAZ consiste en la evaluación que se presenta en el informe energético anual. Como se muestra en el apartado “Planificación energética” de este mismo documento, sólo se generan y actualizan las líneas base de los 4 equipamientos singulares. Estos cuatro equipamientos tan sólo supusieron el 9% de la energía

total consumida por los equipamientos en el año 2022. En este sentido, **la evaluación del consumo energético real contra el esperado es un requisito que no quedaría satisfecho** al no disponer de LBEs de edificios que consumen el 91% del total de energía consumida por los equipamientos gestionados por el Ayuntamiento de Zaragoza.

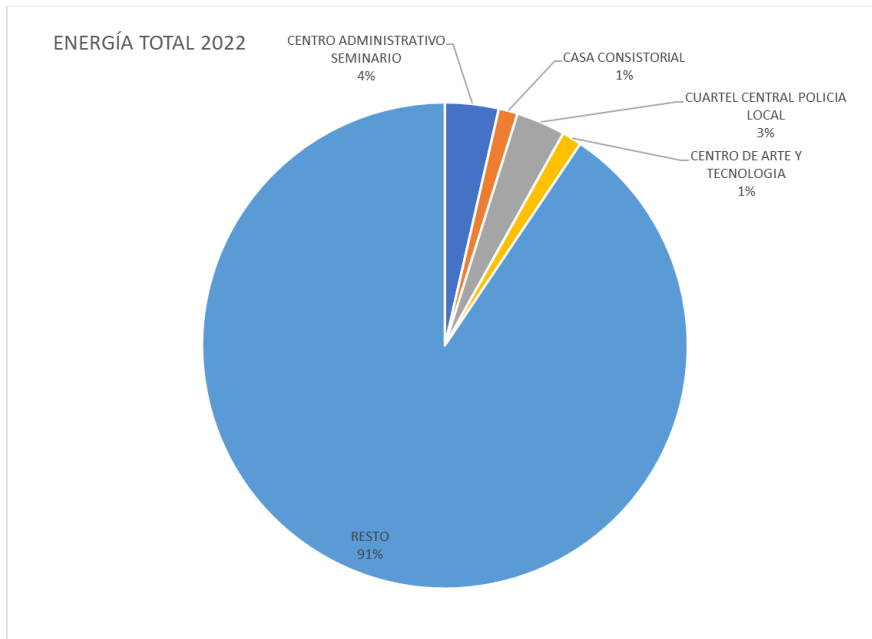


Figura 18 Consumo de Equipamientos Singulares frente al total, 2022. Fuente: PEECAZ

3.4.2 Auditoría interna

La organización debe llevar a cabo auditorías internas regulares para evaluar el cumplimiento de los requisitos de ISO 50001 y la eficacia del sistema.

ISO 50001, apartado verificación, punto 4.6.1, **Auditoría interna del sistema de gestión de la energía.** “Debe desarrollarse un plan y un cronograma de auditorías considerando el estado y la importancia de los procesos y las áreas a auditar, así como los resultados de auditorías previas.”

Entre las medidas expuestas en el PEECAZ (*Tabla1*), está la realización de auditorías energéticas de todos los equipamientos municipales.

3.5 Conclusiones

El Plan Estratégico de Energía y Clima del Ayuntamiento de Zaragoza es un excelente punto de partida para implantar un Sistema de Gestión Energética certificable según la norma ISO 50001. Establece una política energética adecuada y de la cual emanan el resto de los contenidos. Realiza una evaluación energética completa inicial y define el procedimiento para las revisiones energéticas posteriores. Establece unas metas y define una serie de medidas para alcanzarlas.

Como se comenta en el apartado “Seguimiento y medición”, la organización debe ser capaz de evaluar el consumo energético real contra el esperado. La ausencia de líneas base de la gran mayoría de los equipamientos imposibilitan esta evaluación.

Esta sección justifica la necesidad de generar líneas base de los equipamientos gestionados por el ayuntamiento. Los métodos desarrollados en este estudio permiten tener una estimación de la línea base energética de edificios tipo gran terciario de muy distinta configuración y uso. Además, se ha visto que la monitorización y registro de consumos de los distintos equipos consumidores de energía es un proyecto a largo plazo. Las siguientes secciones tienen por objeto abordar esta problemática y ofrecer una solución para un mayor conocimiento del consumo energético, su evolución, y los parámetros más relevantes.

4 METODOLOGÍAS DE OBTENCIÓN DE LÍNEAS BASE

La modelización de una línea base es una fase de un programa de M&V. Esta curva permitirá predecir el consumo energético del edificio en estudio, con el fin de verificar el ahorro energético tras la implementación de un proyecto de mejora de eficiencia. Se distinguen dos escenarios: el escenario de modelado, en el cual se recopila información para lograr un ajuste óptimo del modelo de línea base, y el escenario post mejora, en el que, una vez realizada la mejora de eficiencia, se puede obtener tanto el consumo real como el consumo hipotético del edificio si no se hubiera implementado la mejora, gracias al uso de la línea base.

4.1 Tipos de línea base

Nos encontramos con múltiples métodos en la literatura empleados en la obtención de líneas base, tanto los modelos de benchmarking específicos para edificaciones [10,11] como modelos matemáticos [12-15]. A continuación se da un breve resumen de estos:

- Modelos de Benchmarking:

Estos modelos parten de mediciones reales de edificios de tipología similar. Los indicadores de eficiencia del edificio dato se utilizan para, mediante regresión, estimar el consumo energético del edificio a estudio.

- Modelos de regresión:

Son los más sencillos y utilizados para realizar los estudios de línea base. En las guías más famosas se incluyen anexos donde describen el proceso de construcción de estos. Estos modelos se caracterizan por realizar una aproximación de una variable salida (dependiente) en función de los valores de una o varias variables de entrada (independientes). Con ello se obtiene una ecuación lineal (caso regresión simple) que estima el valor de una forma sencilla, las principales desventajas de este modelado son la poca correlación de los resultados vs los valores reales, además de no tener en cuenta momentos pasados.

- Modelos computacionales:

Se caracterizan por usar algoritmos matemáticos de alto nivel para agrupar y clasificar datos mediante métodos complejos de agrupamiento y así realizar luego estimaciones. Dependiendo del método de clasificación que realicen se distinguen tres grupos: geométricos basados en distancias, probabilísticos y lógicos basados en comportamiento (árboles de decisión). Entre sus ventajas destaca los valores de error que se obtienen y entre sus desventajas encontramos la necesidad de especialización y conocimientos de aquel que lo modela y el alto nivel computacional necesario para llevarlos a cabo en comparación con otros métodos.

Dentro de esta categoría nos encontramos modelos como la máquina de vectores de soporte o redes neuronales artificiales. También están englobados en esta categoría los modelos de clustering, que no es un modelo concreto sino un conjunto de ellos que tienen en común el empleo de la agrupación de datos

de entrada por semejanza con el objetivo de reducir la dimensionalidad del problema antes de generar la línea base.

- Modelos de caracterización inversa:

Basado en el uso de funciones de transferencia. Proporciona una estimación del consumo del edificio a partir de las distintas excitaciones del sistema, teniendo en cuenta el instante de cálculo y también momentos pasados a éste. Estos modelos tienen en cuenta la inercia térmica de un edificio, y ofrecen una buena aproximación de la respuesta dinámica de una instalación de HVAC.

4.2 Regresión lineal simple

La regresión lineal simple es con diferencia el método más sencillo de obtención de una línea base energética. El proceso de su confección está descrito en la norma ISO 50006 [8] así como en numerosas guías de M&V, y consta de los siguientes pasos:

4.2.1 Seleccionar un periodo de datos representativo y adecuado

Recopilar información sobre el consumo energético de un periodo representativo. Idealmente de 2 años o más, ya que los datos de un único año no siempre serían representativos o podrían tener desviaciones puntuales (año de temperaturas extremas, de escasez de combustible, o de pandemia, por ejemplo). Es común que estos datos provengan de facturas mensuales, o medidores ubicados en los puntos de suministro o consumo relevantes que ofrezcan curvas de carga bien generales o bien de equipos concretos.

4.2.2 Preparar los datos

Para eliminar la posibilidad de datos falsos en la muestra, debe realizarse un filtrado de datos al eliminar aquellos que no representan el comportamiento normal (errores de calibración de instrumentos, errores humanos, fechas con eventos particulares...).

Identificar las variables independientes que influyen en el comportamiento energético (producción, grados-día de calefacción/refrigeración, radiación solar, etc.)

Tabular los datos. Debemos disponer de una base de datos en forma matricial, en la que cada dato sea un vector que contenga la fecha (o referencia temporal), el consumo energético, y los valores de las variables independientes que el usuario haya decidido son relevantes.

4.2.3 Graficar los datos

Una vez realizado el filtrado de datos y eliminado la posibilidad de datos falsos, se puede establecer el modelo matemático de línea base. En este punto hay que graficar el consumo de energía en función de cada variable seleccionada. Un gráfico de dispersión es la opción más adecuada para mostrar la relación entre dos conjuntos asociados de datos y muestra los pares como una nube de puntos.

4.2.4 Generar línea de tendencia

La línea de ajuste se genera de manera automática en herramientas como Excel, buscará aproximar la relación de dependencia entre la variable dependiente Y (consumo, consumo por unidad de producción, consumo por unidad de superficie...) con variables independientes X_i (toneladas de producción, temperatura...). En el caso del presente estudio, la regresión lineal

aplicada será en todo momento regresión lineal simple, con una única variable independiente X . La expresión buscada tendrá la siguiente forma:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 \quad (3)$$

donde:

Y es la variable dependiente o de respuesta.

X es la variable independiente o regresora.

β_0 y β_1 son los parámetros, miden la influencia que las variables independientes tienen sobre la dependiente. β_1 corresponde a la pendiente de la recta y β_0 a la ordenada en el origen.

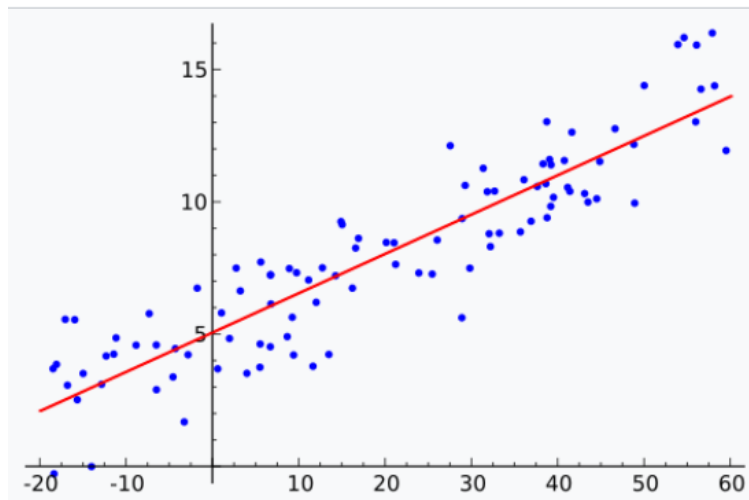


Figura 19 Regresión lineal con una variable dependiente y una variable independiente

4.2.5 Calcular e interpretar el coeficiente de determinación R^2

El coeficiente de determinación *r cuadrado*, determina la calidad del modelo estadístico para replicar los resultados, y la proporción de variación de los resultados que puede explicarse por el modelo. En el caso de la regresión lineal simple, R^2 es simplemente el cuadrado del coeficiente de correlación de Pearson.

$$R^2 = \frac{\sigma_{XY}^2}{\sigma_X^2 \sigma_Y^2} = \rho^2 \quad (4)$$

donde:

σ_{XY} es la covarianza de (X, Y) .

σ_X^2 es la varianza de la variable X .

σ_Y^2 es la varianza de la variable Y .

R^2 siempre toma valores entre 0 y 1. Valores cercanos a 1 indican una mayor correlación entre las variables y por tanto un mejor ajuste del modelo. Por otro lado, un valor cercano a 0 nos da a entender que la variable X seleccionada no tiene influencia sobre la variable Y . El coeficiente de determinación R^2 es calculado por Excel automáticamente.

El paso 4.2.5 consiste en seleccionar la variable independiente de entre aquellas consideradas en el paso 4.2.2 que sea más adecuada para la definición de una línea base, utilizando como criterio principal el valor de R^2 .

4.3 Clustering

El clustering es uno de los métodos de reducción de la dimensionalidad de la minería de datos. La minería de datos engloba a todos aquellos procesos que tratan grandes volúmenes de información para procesarlos, detectar patrones y/o relaciones ocultas con el fin de reducir la complejidad de estos.

El clustering o clustering de vectores se encarga de reducir la dimensionalidad del espacio definido por un conjunto de datos originales y transformarlo en un espacio de menor dimensión que facilite las tareas posteriores que se deban emprender. Esta reducción de la dimensionalidad se consigue con el agrupamiento de las entradas en distintas particiones, de tal manera que los datos englobados dentro de una partición pasarán a ser representados todos por un mismo conjunto de atributos que son los atributos de la partición.

Imaginemos un conjunto de vectores dato Q donde cada componente del vector es un atributo del dato. Estos vectores originales pueden separarse en q grupos ($q < Q$) dado la similitud entre datos y disimilitud entre los grupos. El método de clustering consiste en esta separación, de tal manera que se forman clústeres o grupos de datos que se definen por su centroide. El centroide de un clúster es un vector de atributos calculado mediante la media de los atributos de los datos de dentro de cada clúster, que pasará a representar todos los datos que engloba. Con esto conseguiremos pasar de un espacio de dimensión Q datos a un espacio de dimensión q clústeres.

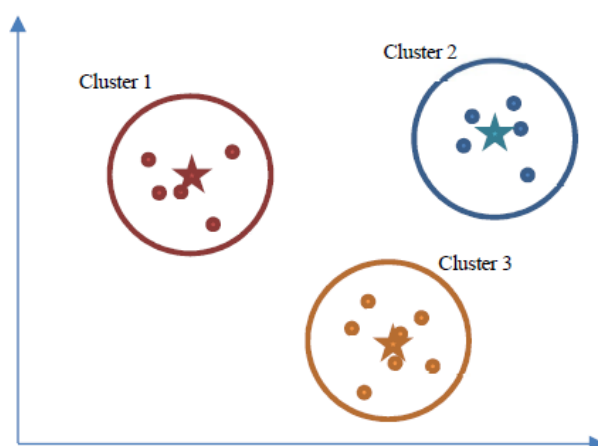


Figura 20 Centroides y clústeres.

Dos puntos fundamentales a la hora de aplicar un método de clustering son la medida de la distancia y el índice de evaluación.

4.3.1 Distancia euclidiana

Se entiende por **medida de la distancia** como la herramienta matemática que usa las distintas técnicas para segregar los datos. Para un mejor entendimiento, la distancia entre dos puntos dato es equivalente a la medida de la similitud. Para el cálculo de esta similitud entre ellos hay diversas utilidades matemáticas [16]. En el presente trabajo, y para todas las aplicaciones de clustering llevadas a cabo, se ha utilizado la **distancia euclidiana**:

Supongamos un conjunto vectorial de datos expresados como $x_1, x_2, x_3, \dots, x_m$ donde x_i representa un vector dato formado por n atributos, de tal manera que $x_i = (x_{i1}, x_{i2}, x_{i3}, \dots, x_{in})$

La distancia entre un dato x_s y x_t queda en función del método de la siguiente manera:

$$d_{st}^2 = (x_{s1} - x_{t1})^2 + (x_{s2} - x_{t2})^2 + \dots + (x_{sn} - x_{tn})^2 \quad (5)$$

4.3.2 Índice de Davies-Bouldin

El **índice de evaluación** no es más que la valoración del método, es un índice que permite hacer visible el error causado en la aproximación realizada al pasar de Q datos a q clústeres. Este valor permitirá decidir un número de clústeres óptimo de tal manera que la reducción de la dimensionalidad no se vea comprometida por el error causado. Existen múltiples índices en la literatura [16], sin embargo, en esta sección se explicará únicamente el de **Davies-Bouldin** por ser el que se va a emplear en el estudio:

$$DB = \frac{1}{n} * \sum_{i=1}^n \max_{i \neq j} \left(\frac{\sigma_i + \sigma_j}{d(c_i, c_j)} \right) \quad (6)$$

donde:

n es el número de clústeres

c representa el centroide

σ es la distancia media de los datos al clúster que pertenecen.

Los índices i y j representan dos clústeres distintos.

Se calcula el promedio de similitud de cada clúster con el clúster más parecido a él. Valores más bajos nos indican mejores resultados. El índice de Davies-Bouldin toma mejores resultados cuando los elementos dentro de un clúster están próximos a su centroide, pero los centroides de los distintos clústeres están separados entre ellos.

El cálculo del número óptimo de clústeres se realizará con una función programada en Matlab.

4.3.3 K-means

Las técnicas jerárquicas de clustering parten de una situación inicial sin un número de clústeres definido, y se diferencian entre aglomerativos y disociativos dependiendo de si el método va agrupando datos partiendo de tantos clústeres como datos ($q=Q$) o por el contrario va separándolos, partiendo de un único clúster ($q=1$).

Las técnicas no jerárquicas parten de una situación inicial ya agrupada. El método se encarga de reorganizar los datos para obtener una partición optimizada dado un número de clústeres que se proporciona al algoritmo [16]. El método K-means pertenece a la categoría de técnicas de clustering no jerárquicas.

K-means es uno de los métodos más utilizados a la hora de hablar de clustering y el método utilizado en el presente trabajo. Su funcionamiento se basa en la obtención de un espacio con un número determinado de clústeres que minimice la función de coste E , realizando una segmentación de mínima varianza.

El método consta de las siguientes etapas:

1. Segmentación inicial de todos los datos, de forma arbitraria o previamente estudiada por el usuario. Cálculo de los centroides de los clústeres iniciales.
2. Mover cada dato al clúster más cercano si cumple la condición:

$$\|x_i - q_l\| < \|x_i - q_k\| \quad (7)$$

Siendo x_i el elemento que se mueve, q_l el centroide del clúster al que se mueve y q_k el centroide del clúster del que proviene.

3. Recalcular los centroides de la nueva segmentación.
4. Realizar los pasos 2 y 3 hasta que ningún elemento se mueva de un clúster a otro.

Como conclusión a este método decir que es simple pero efectivo, necesita gran cantidad de computación cuando el número de datos es extenso. Hay que proporcionar el número de clústeres en los que se va a dividir el conjunto de datos. Esto último es una de las principales decisiones que el usuario deberá de tomar a la hora de emplear este método ya que no es conveniente un número grande de clústeres, pero tampoco es conveniente un número pequeño ya que el error de aproximación tomaría valores muy elevados.

El procedimiento de clustering se desarrolla en Matlab debido a que en este software ya encontramos dentro de su biblioteca la función `KMeans`.

4.3.4 Matlab

Tras haber tabulado y normalizado los datos de entrada en Excel, el método de clustering propuesto se desarrolla en Matlab.

4.3.4.1 Obtención de *OptimalK*

El primer paso consiste en averiguar el número óptimo de clústeres (*OptimalK*). La solución de agrupamiento óptima tiene el valor más pequeño del índice de Davies-Bouldin. Sólo aceptaremos un valor de K cuando el índice de Davies-Bouldin esté por debajo de 0,9. Para obtener este valor, llamaremos a la función de Matlab `evalclusters`. Los parámetros de entrada a esta función son la matriz con todos los datos a agrupar (X), el método de clustering (`kmeans`),

el criterio a aplicar (DaviesBouldin) y un rango de valores de K a probar por la función. La función devuelve una matriz fila con los valores de K, otra matriz fila con los correspondientes valores de índice del Davies-Bouldin obtenidos para cada valor probado, y por último un valor OptimalK que es el valor para el cual se ha obtenido el mejor resultado.

```
evaluation= evalclusters(basedatos2022,"kmeans","DaviesBouldin","KList",2:20)

evaluation =
  DaviesBouldinEvaluation with properties:
    NumObservations: 365
    InspectedK: [2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20]
    CriterionValues: [1.0495 0.8761 0.7565 0.8933 0.8639 0.9207 0.9853 0.8851 0.8781 0.9797 0.9385 0.8614]
    OptimalK: 4

"K=evaluation.OptimalK"
```

Figura 21 Obtención de OptimalK en Matlab.

4.3.4.2 Agrupación de los datos en clústeres

Para ejecutar la técnica de agrupación K-means, haremos uso de la función de Matlab *kmeans*. Los datos de entrada a esta función son la matriz de datos y el valor de K escogido en el paso anterior.

```
[idx,C,sumd,D]=kmeans(basedatos2022,K)
```

Figura 22 Función kmeans en Matlab.

Los argumentos de salida de la función son:

- idx: Índices de grupo, devueltos como un vector columna numérico. idx tiene tantas filas como X y cada fila indica la asignación de grupo de cada observación correspondiente.
- C: Ubicaciones del centroide del grupo, devueltas como una matriz numérica. C es una matriz con K filas, y las mismas columnas que la matriz X.
- sumd: Sumas dentro del grupo de las distancias euclidianas del punto hasta el centroide, devueltas como un vector columna numérico. sumd es un vector k por 1, donde el elemento j es la suma de las distancias euclidianas del punto hasta el centro dentro del grupo j.
- D: Distancias euclidianas desde cada punto a cada centroide, devueltas como una matriz numérica. D es una matriz n por k, donde el elemento (j, m) es la distancia desde la observación j hasta el centroide m.

4.3.4.3 Asignación de datos en clústeres

El último paso consiste en clasificar un nuevo conjunto de datos (datos de testing) usando los grupos existentes, mediante la función de Matlab *pdist2*. Esta función encuentra el centroide más cercano de cada punto de datos de prueba. La matriz de datos de testing (Xtesting) tiene la misma estructura que la matriz de datos de entrada (X) excepto por la columna que contiene los consumos energéticos. El argumento de salida de la función (idx_test), es un vector columna numérico que tiene tantas filas como Xtesting y cada fila indica la asignación de clúster de cada observación correspondiente.

```
[~,idx_test] = pdist2(C,basedatos2023,'euclidean','Smallest',1);
```

Figura 23 Asignación de observaciones en clústeres en Matlab.

4.4 Objetivos

Existe una necesidad en el Ayuntamiento de Zaragoza de disponer de líneas base energéticas que permitan dimensionar los ahorros producidos por distintas inversiones en eficiencia.

La Unidad de Energía e Instalaciones del Ayuntamiento de Zaragoza gestiona un total de 820 equipamientos incluyendo edificios de tipo administrativo, centros escolares, pabellones deportivos... Entre los equipamientos nos encontramos con edificios que deben mantener una temperatura de confort en el interior prácticamente todos los días del año, otros que funcionan de manera continua durante los meses de temporada y cierran el resto de los meses, piscinas climatizadas, edificios que son abastecidos por electricidad, otros por electricidad y también gas natural... en definitiva, multitud de edificios de muy distinta configuración y uso.

Algo que tienen en común la mayoría de estos equipamientos es la falta de equipos de medición de consumos, estando disponibles únicamente los consumos totales de cada edificio y en muchas ocasiones en forma de facturas mensuales.

Existen múltiples métodos para la obtención de líneas base energéticas, como se ha revisado en apartados anteriores. Algunos de los mencionados logran predicciones de una gran precisión a cambio de un enorme trabajo previo de medición, o de una gran complejidad matemática, o de la necesidad de contratar a un consultor externo que establezca los modelos para incorporarlos al sistema de gestión energética de la administración. Estos requerimientos harían imposibles de implementar a la escala necesaria tales métodos, o mejor dicho, no podrían ser implementados en un plazo de tiempo realista.

Lo que busca este estudio es, en definitiva, ofrecer una posibilidad realista para la Unidad de Energía e Instalaciones del Ayuntamiento de Zaragoza de establecer líneas base energéticas capaces de englobar la mayor parte de los consumos energéticos gestionados por la administración. Para ello, se han estudiado los métodos de **regresión lineal simple** y **clustering** con el objetivo de probar su adecuación en los siguientes aspectos:

- Validez de la estimación: Si bien es cierto que la precisión no es el punto fuerte de estos métodos, debemos poder llegar a un modelo de predicción válido.
- Sencillez en su implementación: Los modelos deben ser fáciles de implementar y actualizar por la Unidad de Energía e Instalaciones del Ayuntamiento de Zaragoza sin requerir ayuda de una consultora externa.
- Adaptabilidad a distintos casos: Buscamos un método que genere líneas base correctas para edificios muy diferentes entre ellos.
- Necesidad de datos de partida: En la mayoría de los equipamientos no se dispone de mediciones de consumo adicionales. Por tanto, el modelo buscado tiene que ser capaz de generar una línea base partiendo de información básica.

Un objetivo adicional del presente trabajo es el de implementar el método de Desglose Automático de Consumos Energéticos en Edificios Terciarios [16] descrito en el citado trabajo de fin de grado, el cual es una aplicación del método de clustering que busca, partiendo de datos de consumo total, desglosarlos en distintos términos. Este método se ha aplicado únicamente en el apartado *5.1.4 ESTUDIO 1. Desglose de consumos* que se puede leer más adelante.

5 CASOS A ESTUDIO

En este bloque del trabajo se exponen los diferentes casos y estudios desarrollados.

El CASO1 es el Edificio Seminario, un edificio de tipo administrativo que constituye un gran consumidor de energía (eléctrica). Se han realizado dos estudios sobre esta instalación: El primero, una comprobación de la aplicabilidad de un método de desglose automático. El segundo estudio consiste en la obtención de líneas base por los métodos de regresión lineal y clustering, y la comparación de los resultados obtenidos con la línea base existente.

El CASO2 consiste en la obtención de líneas base, de nuevo por los métodos de regresión lineal y clustering, para el centro deportivo municipal Palafox. Con este estudio se busca comprobar la validez de estos métodos en un edificio con un perfil de consumo muy diferente al de un edificio puramente administrativo.

5.1 CASO 1: Edificio Seminario

5.1.1 Alcance

En el capítulo que se expone a continuación se hará uso de un caso conocido de consumos en un edificio terciario como es el edificio Seminario.

Entre los objetivos de este apartado encontramos:

- Validación del procedimiento de desglose de consumos descritos en “Desglose Automático de Consumos Energéticos en Edificios Terciarios y Obtención de Líneas Base” [16].
- Validación de los procedimientos de obtención de LBE descritos en el capítulo 4 del presente trabajo.
- Visualización del consumo diario del edificio.
- Identificación de parámetros clave que gobiernan el comportamiento energético del edificio.
- Detección de outliers.

5.1.2 Emplazamiento

El edificio Seminario se sitúa al suroeste de la ciudad de Zaragoza, ubicado en las coordenadas:

Latitud: 41.64

Longitud: -0.91

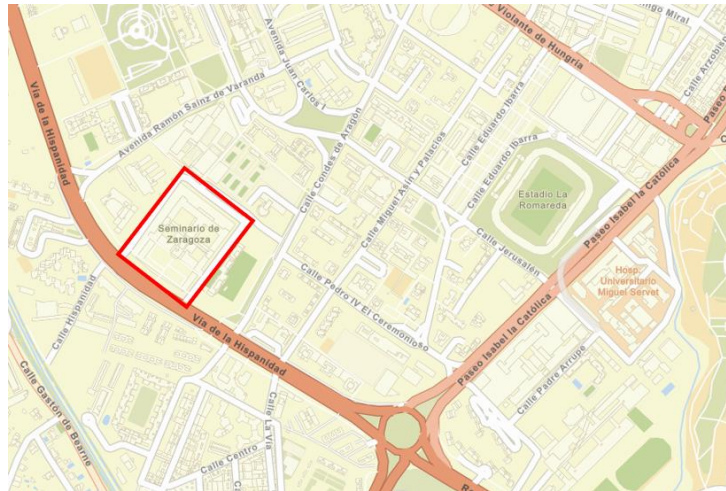


Figura 24 Emplazamiento Edificio Seminario. fuente: Google maps



Figura 25 Modelo 3D Edificio Seminario. Fuente: Google Earth

5.1.3 Análisis de consumos del edificio a estudio

El edificio a estudio utiliza como única fuente de energía la electricidad para cubrir todas las necesidades de sus ocupantes y del propio edificio, entre ellas:

- Sistemas de seguridad y antiincendios.
- Ascensores.
- Sistemas de domótica.
- Iluminación y equipos informáticos.
- ACS.
- Climatización.
- Centro de procesamiento de datos.
- Otros.

La decisión de qué modelos de caracterización aplicar, así como las particularidades de su aplicación, están fuertemente condicionados por la disponibilidad en las diferentes bases de datos de históricos de consumo.

El Ayuntamiento de Zaragoza cuenta con un Sistema Informático de Gestión Integral de Arquitectura (SIARQ), que permite enlazar la gestión de mantenimiento correctivo y preventivo de todos los equipamientos con la gestión de limpieza de los centros, el gasto energético, el estado de los diversos contratos en vigor, dando una información integrada de cada instalación. Este sistema informático dispone de curvas horarias de consumo eléctrico además de un histórico de facturas tanto eléctricas como de gas, para todos los edificios municipales.

Para el edificio Seminario, los técnicos del departamento de Conservación de Arquitectura instalaron medidores que recogen consumos de energía y almacenan los datos en una plataforma llamada Enerclie.

En la *Figura 23* se muestran los límites temporales de las distintas fuentes de información mencionadas.

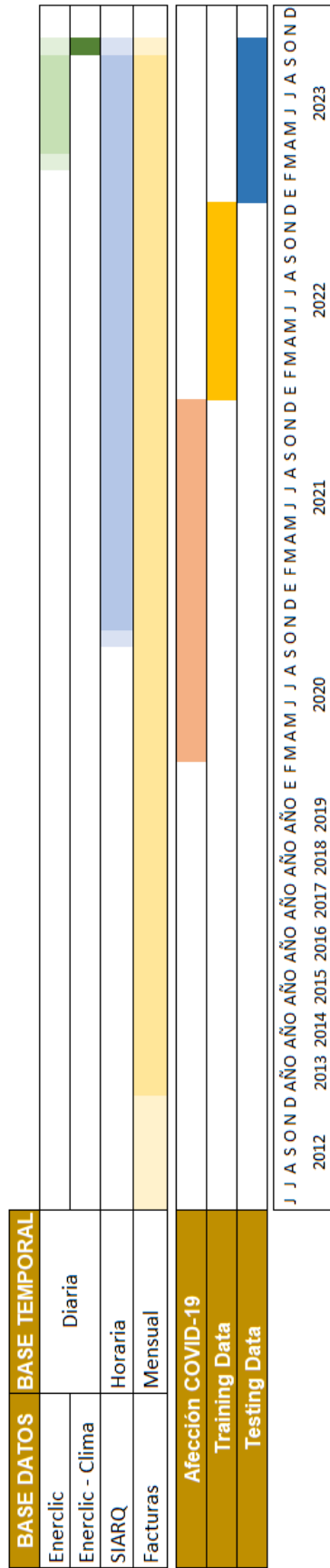


Figura 26 Disponibilidad de datos y consideraciones en el histórico. CASO1.

5.1.4 ESTUDIO 1. Desglose de consumos

Este primer caso de estudio es una aplicación de la metodología descrita en “Desglose Automático de Consumos Energéticos en Edificios Terciarios y Obtención de Líneas Base” [16] al caso real del Edificio Seminario.

5.1.4.1 Fase1: Selección de datos de entrada

5.1.4.1.1 Límites temporales

El primer paso consiste en seleccionar los límites temporales de los datos a utilizar como training data y como testing data. El método tal y como se describe en el estudio en el que se basa, requiere de un año completo de mediciones en base diaria. Se dispone de estos datos para los años 2021 y 2022. El año 2021 se considera anómalo debido a la afección que tuvo la pandemia COVID-19 en el uso del edificio, por lo tanto para este estudio se han empleado los datos del año 2022 presentes en SIARQ en base horaria, los cuales se han pasado a base diaria.

Para comprobar la validez del método es necesario comparar los resultados con mediciones reales de los consumos desglosados, para ello hemos contado únicamente con las mediciones tomadas durante el mes de octubre de 2023, gracias a la instalación de medidores específicos para los consumos de clima del edificio, también en base diaria.

5.1.4.1.2 Desglose mediciones

El método plantea el desglose del consumo total del edificio en tres términos: C_{fijo} , $C_{ocupación}$ y C_{HVAC} .

- C_{fijo} representa el consumo constante del edificio, y está asociado a los equipos que funcionan permanentemente, como cámaras de seguridad y centro de procesamiento de datos.
- $C_{ocupación}$ es un valor variable, que depende de la ocupación del edificio. La luz y la producción de agua caliente sanitaria serían ejemplos de estos consumos energéticos.
- C_{HVAC} es el gasto debido al funcionamiento de equipos de calefacción, refrigeración, renovación del aire. Cabe esperar que su valor esté fuertemente relacionado con la climatología.

En los edificios terciarios, el consumo de clima suele ser mayor que los otros dos. En el estudio donde se desarrolla este método [11], se ofrece la posibilidad de realizar un desglose simplificado en dos: $C_{usuario}$ y C_{HVAC} en caso de no contar con el suficiente nivel de desglose en los datos medidos o bien que se quiera centrar el análisis únicamente en el consumo de clima (C_{HVAC}). Siendo $C_{usuario}$ el nombre dado a un consumo que representa la suma de $C_{ocupación}$ y C_{fijo} .

Se ha realizado el desglose de consumos tricomponente por ofrecer información más completa e interesante, pero el término C_{HVAC} es el único del cual se ha podido comprobar la calidad de la estimación en el presente estudio, por ser el consumo de clima el único del cual se dispone de mediciones reales desglosadas en octubre de 2023 (periodo de testing).

5.1.4.2 Fase 2: Preparación de los datos de entrada

Los datos empleados para llevar a cabo el algoritmo son:

- Consumo total: Consumo diario de la edificación, expresado en unidades de kWh.

- Temperatura media: Temperatura media diaria, a 2 metros del suelo. Variable obtenida de la base de datos de la NASA y medida en °C. En adelante, *Temperatura*.
- Radiación: Radiación solar horizontal en la ubicación del edificio. Obtenida de la base de datos de la NASA y medida en kWh/m2.
- Uso: Referencia el nivel de ocupación del edificio para un día dado. Esta información se extrae del calendario oficial del ayuntamiento y toma únicamente dos valores: 1 para los días de lunes a viernes no festivos, y 0 para sábados, domingos y festivos, cuando el edificio permanece cerrado.

A continuación se muestra un extracto de la tabla con los datos de entrada del problema:

Fecha	Uso	T (C°)	Radiación (kWh/m2)	Consumo (kWh)
2022-01-01	0	11,4	1,87	3149
2022-01-02	0	11,0	1,97	3132
2022-01-03	1	11,1	2,18	13129
2022-01-04	1	10,3	1,8	12855
2022-01-05	1	5,6	1,8	12839

Tabla 2 Fragmento datos de partida. CASO1, Estudio 1.

Una vez disponemos de los datos en base diaria estos deben ser normalizados previo cálculo de la media y la desviación típica:

	TEMP (C°)	Radiación (kWh/m2)	CONSUMO (kWh)
MEDIA	16,9	4,6	8984,5
DESV. TIPICA	8,2	2,3	3763,3

Tabla 3 Medidas estadísticas variables de entrada. CASO1, Estudio 1.

Fecha	Uso	T	Radiación	Consumo
2022-01-01	0	-0,68	-1,18	-1,6
2022-01-02	0	-0,72	-1,14	-1,6
2022-01-03	1	-0,71	-1,05	1,1
2022-01-04	1	-0,80	-1,21	1,0
2022-01-05	1	-1,38	-1,21	1,0

Tabla 4 Variables Normalizadas. CASO1, Estudio 1.

5.1.4.3 Fase 3: Clustering

El clustering tiene por objetivo reducir la dimensionalidad de los datos, al agrupar el espacio de vectores diarios en una serie de representantes, que serán los centroides de los diferentes clústeres.

Estos clústeres se obtienen realizando el algoritmo K-means sobre los datos de entrada, que se lleva a cabo en dos pasos:

5.1.4.3.1 Número óptimo Clústeres

Se siguen los criterios de selección del número óptimo de clústeres utilizados en el TFG en el que se basa este estudio:

- Índice de Davies-Boulding menor a 0,9.
- Variables enteras de ocupación de los centroides no decimales. Las variables enteras de ocupación en los centroides de los clústeres deben de seguir siendo enteras, dado que los cálculos de consumos fijo y ocupación se basarán en la observación de esta variable.
- Variedad: Debemos obtener al menos un clúster de cada tipo de día en el rango de temperatura de no trabajo de clima.

El proceso de búsqueda del número óptimo de clústeres es iterativo teniendo en cuenta los límites mencionados arriba. Se aplica un criterio de minimizar el número total de clústeres mientras se cumpla con las condiciones expuestas.

Intervalo	Nº Óptimo Clústers	Índice D-B
[2:20]	15	0,8262

Tabla 5 Número Óptimo de Clústeres. CASO1, Estudio 1.

Se opta por elegir 15 clústeres con un Índice de Davies-Bouldin de 0.8262.

5.1.4.3.2 Agrupación en Clústeres

De los tres criterios empleados para la selección de N.º óptimo de clústeres, los dos últimos sólo se conocen una vez llevada a cabo la agrupación de los datos. Por lo tanto, el número de clústeres seleccionado puede no arrojar una agrupación válida obligando al usuario del método a recalcular el paso anterior.

A continuación se muestra la agrupación de clústeres obtenida, una vez convertidas las variables normalizadas a sus unidades correspondientes.

Cluster	Uso	T	Radiacion	Consumo	Nº Componentes
1	1	20,5	2,5	9054,2	15
2	0	20,3	4,2	5316,1	17
3	1	4,8	3,0	14999,6	15
4	0	7,2	3,9	3447,1	22
5	1	26,9	7,5	12576,7	66
6	1	9,3	2,8	12782,9	24
7	1	18,7	7,6	8314,1	14
8	0	26,9	7,2	4880,3	33
9	1	14,0	2,2	8556,3	19
10	0	9,2	2,0	3312,6	29
11	1	10,3	4,8	11478,7	19
12	1	9,7	1,7	10430,2	38
13	1	16,6	4,7	8037,0	27
14	0	16,0	6,8	3287,1	9
15	1	24,9	5,3	12132,0	18

Tabla 6 Clústeres. CASO1, Estudio 1.

Un primer análisis visual ayuda a entender el resultado de la agrupación obtenida. Matlab nos devuelve un vector columna idx que indica el clúster al que pertenece cada dato de entrada, es decir cada día. Podemos representar este vector en un heatmap como se muestra a continuación:

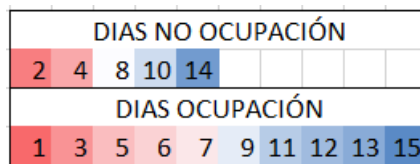
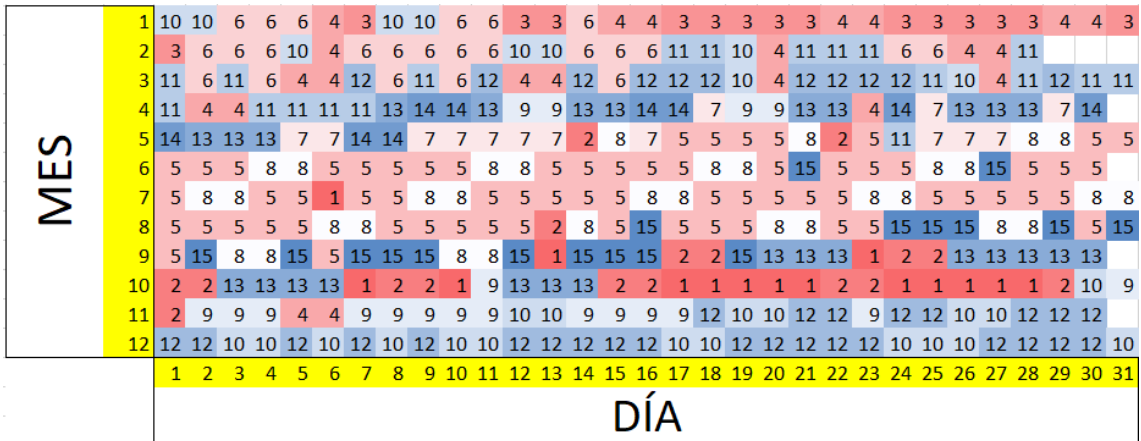


Tabla 7 Heatmap clústeres. CASO1, Estudio 1.

Una vez obtenidos y visualizados los clústeres, pasamos al desglose de consumos.

5.1.4.4 Fase 4: Desglose de consumos

Se ha llevado a cabo el proceso de desglose de consumos tricomponente:

$$C = C_{fijo} + C_{ocupación} + C_{HVAC} \quad (8)$$

Sin embargo, dado que disponemos de datos para testing en los que tan sólo el consumo de clima está separado, el único error de estimación que se ha podido comprobar es el de C_{HVAC} .

5.1.4.4.1 Consumo fijo

Este consumo corresponde al de los equipos que funcionan de manera constante, independientemente de la ocupación del edificio, o de las variables climáticas elegidas por el usuario para el análisis. Para su obtención se busca el consumo de los días en los que el edificio no está ocupado y en los que el sistema de climatización no funciona.

El sistema de climatización tiene consignada una temperatura de 18°C. Esto se verifica experimentalmente realizando una regresión lineal tomando únicamente los días en los que el edificio estaba ocupado (Figura 22).

Se ha considerado un rango de temperaturas medias exteriores, centrado en este valor en el cual no trabajan los equipos de climatización que va de los 16°C a los 20°C. Dentro de este intervalo la temperatura exterior es de confort y por lo tanto el consumo de climatización es nulo.

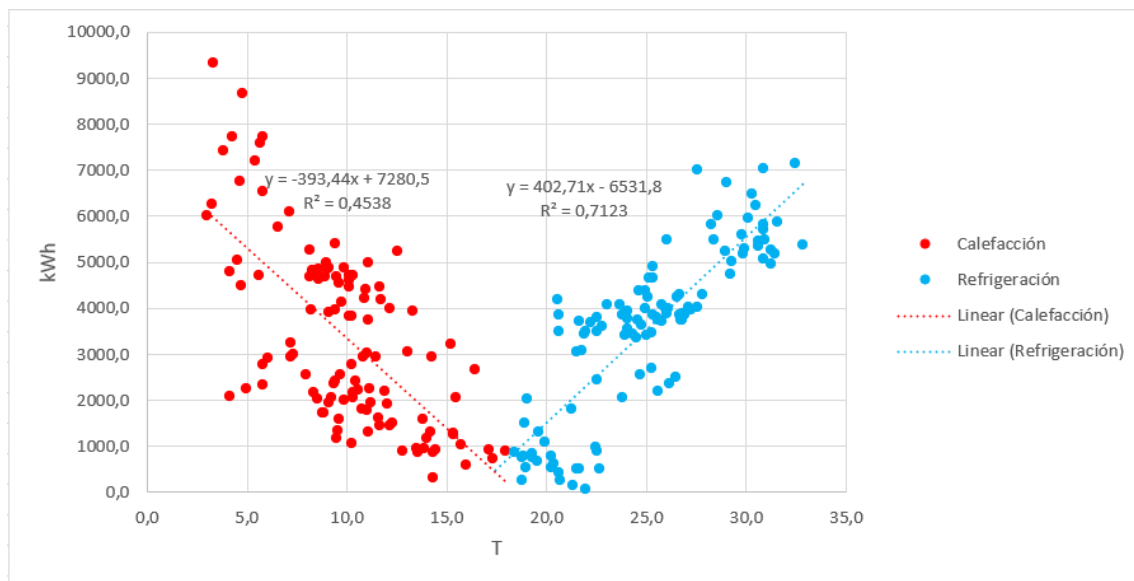


Figura 27 Consumos frente a temperatura media exterior. CASO1, Estudio 1.

Para identificar el consumo fijo se realiza una búsqueda en los clústeres de que se dispone, con las siguientes restricciones:

- Uso: 0 (Día sin ocupación)
- $16^{\circ}\text{C} \leq T \leq 20^{\circ}\text{C}$ (Sistema de climatización no trabaja)

Obtenemos el siguiente clúster:

Cluster	Uso	T	Radiación	Consumo	Nº Componentes
14	0	16,0	6,8	3287,1	9

Tabla 8 Cálculo consumo fijo. CASO1, Estudio 1.

El consumo fijo estimado diario durante todo el año es de 3287,1 KWh, siempre y cuando el consumo total supere este valor. De lo contrario, el consumo fijo del edificio será igual al consumo real total del día específico.

5.1.4.4.2 Consumo de ocupación

La variable *Uso* define la ocupación del edificio y por tanto el consumo asociado. Es trivial que para los días con un valor cero de la variable *Uso*, el consumo de ocupación es 0KWh.

Cluster	Uso	T	Radiación	Consumo	Nº Componentes
7	1	18,7	7,6	8314,1	14
13	1	16,6	4,7	8037,0	27

Tabla 9 Cálculo consumo ocupación. CASO1, Estudio 1.

Los clústeres 7 y 13 representan a la totalidad de los días que reúnen las siguientes condiciones:

- Uso: 1 (Día con ocupación)
- $16^{\circ}\text{C} \leq T \leq 20^{\circ}\text{C}$ (Sistema de climatización no trabaja)

Se ha calculado una media de consumo ponderada según el número de días contenidos en cada uno de los dos clústeres ($C_{ponderada}$). De esta manera y para la totalidad de los días incluidos en los clústeres 7 y 13:

$$C_{ponderada} = C_{fijo} + C_{ocupación} = 8131,6 \text{ KWh} \quad (9)$$

$$C_{ocupación} = C_{ponderada} - C_{fijo} = 4844,5 \text{ KWh} \quad (10)$$

El valor del consumo de ocupación del día a estimar tendrá un valor de 4844,5 KWh siempre y cuando la suma del consumo fijo estimado y el consumo de ocupación estimado del día sea menor o igual al consumo total real. En caso contrario, el consumo de ocupación tomará la diferencia entre el consumo total real y el consumo fijo estimado del edificio.

5.1.4.4.3 Consumo de climatización

El método propuesto en el trabajo de fin de grado en el que se basa esta parte del estudio [16] establece la regla de que la suma de los consumos desglosados estimados es igual al consumo total real del edificio. De esta manera, obtenidas las estimaciones de C_{fijo} y $C_{ocupación}$ y conocido el consumo total real, el consumo de clima se obtiene por diferencia con el consumo total medido (C_{real}).

$$C_{HVAC} = C_{real} - C_{fijo} - C_{ocupación} \quad (11)$$

5.1.4.4.4 Estimación mensual

Una vez realizados todos los pasos explicados en la fase 4, es posible desglosar el consumo total diario en las tres componentes que se han explicado.

El desglose en forma gráfica queda de la siguiente forma:

Fecha	Consumo total (kWh)	DESGLOSE		
		Cfijo	Cocup	Cclima
2022-01-01	3149	3149,0	0,0	0,0
2022-01-02	3132	3132,0	0,0	0,0
2022-01-03	13129	3287,1	4844,5	4997,4
2022-01-04	12855	3287,1	4844,5	4723,4
2022-01-05	12839	3287,1	4844,5	4707,4
2022-01-06	4911	3287,1	1623,9	0,0
2022-01-07	13189	3287,1	4844,5	5057,4
2022-01-08	4086	3287,1	798,9	0,0
2022-01-09	4047	3287,1	759,9	0,0
2022-01-10	13368	3287,1	4844,5	5236,4
2022-01-11	12823	3287,1	4844,5	4691,4
2022-01-12	12927	3287,1	4844,5	4795,4
2022-01-13	14157	3287,1	4844,5	6025,4
2022-01-14	12615	3287,1	4844,5	4483,4

Tabla 10 Fragmento de los consumos diarios desglosados. CASO1, Estudio 1.

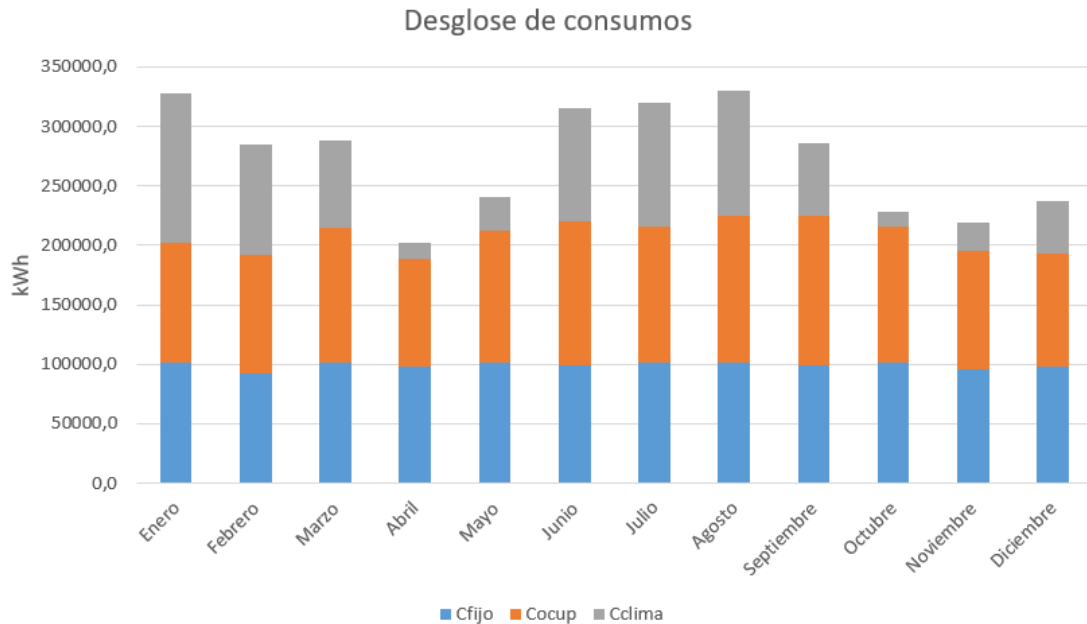


Figura 28 Consumos desglosados mensuales. CASO1, Estudio 1.

5.1.4.5 Fase 5: Testing

En esta sección se va a aplicar el desglose obtenido mediante datos de consumo del año 2022 a los consumos medidos del mes de octubre de 2023.

La elección de este rango temporal se debe a que disponemos de los consumos reales diarios del sistema de climatización por separado comenzando el día 03/10/2023 y hasta el 25/10/2023, siendo la fecha fin el día en que se lleva a cabo este estudio.

Conocidos para cada día del intervalo el consumo total y el de climatización, se han aplicado las reglas de desglose obtenidas en la fase 4, obteniendo los siguientes resultados:

Fecha	Uso	T (C°)	ENERCLIC - DATOS MEDIDOS		DESGLOSE			ERROR (%)
			Ctotal	Cclimareal	Cfijo	Cocup	CHVAC	Clima
03/10/2023	1	22	11838	6459	3287	4845	3706	43%
04/10/2023	1	22	11103	5815	3287	4845	2972	49%
05/10/2023	1	23	10727	5567	3287	4845	2595	53%
06/10/2023	1	23	10659	5556	3287	4845	2527	55%
07/10/2023	0	23	6543	3547	3287	0	3256	8%
08/10/2023	0	23	6543	3609	3287	0	3256	10%
09/10/2023	1	23	10748	5624	3287	4845	2616	53%
10/10/2023	1	21	10562	5548	3287	4845	2431	56%
11/10/2023	1	20	10562	5562	3287	4845	2431	56%
12/10/2023	0	21	7233	3763	3287	0	3946	5%
13/10/2023	1	23	10215	5310	3287	4845	2083	61%
14/10/2023	0	20	6545	3582	3287	0	3257	9%
15/10/2023	0	18	6980	4069	3287	0	3693	9%
16/10/2023	1	19	9647	4524	3287	4845	1516	67%
17/10/2023	1	21	9418	4083	3287	4845	1286	68%
18/10/2023	1	21	9494	4309	3287	4845	1362	68%
19/10/2023	1	19	9470	4337	3287	4845	1338	69%
20/10/2023	1	15	9438	4592	3287	4845	1306	72%
21/10/2023	0	14	7171	4309	3287	0	3883	10%
22/10/2023	0	14	6500	3767	3287	0	3213	15%
23/10/2023	1	17	9569	4495	3287	4845	1438	68%
24/10/2023	1	14	9723	4505	3287	4845	1591	65%
25/10/2023	1	15	9547	4427	3287	4845	1415	68%
ERROR CLIMA PROMEDIO								47%

Tabla 11 Desglose de consumos mes de octubre. CASO1, Estudio 1.

Se observa que los valores de CHVAC obtenidos son inferiores al consumo real de clima, efecto que se agrava notablemente en los días de ocupación del edificio. El promedio de error obtenido en la estimación del consumo de clima es del 47%.

5.1.4.6 Conclusiones

Se ha aplicado la metodología descrita en “Desglose Automático de Consumos Energéticos en Edificios Terciarios y Obtención de Líneas Base” [16] al caso real del Edificio Seminario.

El desglose obtenido no se ajusta correctamente al consumo de climatización del edificio a estudio. El método no sería válido para estimar el desglose de los consumos del edificio a estudio. Es importante tener en consideración que el método se ha probado para un rango de datos que abarca únicamente el mes de octubre del año 2023, y las conclusiones que se pueden extraer del estudio son limitadas por este motivo.

5.1.4.6.1 Consumo de ocupación

La fuente de error en la estimación obtenida está principalmente en lo que se considera como consumo de ocupación del edificio $C_{ocupación}$.

El valor de este consumo se ha obtenido, como se describe en la Fase 4 del estudio, considerando un clúster que representa días de ocupación del edificio en los que la temperatura media se encuentra en el rango de temperatura de confort. El error reside en considerar que por encontrarnos a una temperatura de confort el sistema de climatización del edificio no trabaja. El Edificio Seminario, como es habitual en los edificios terciarios de oficinas cuenta con un sistema no sólo de climatización sino también de ventilación forzada. El sistema de ventilación forzada consta de una serie de UTAs (unidades de tratamiento de aire) que renuevan constantemente el aire del interior del edificio y cuya carga trabajo (y por lo tanto, su consumo) es proporcional a la cantidad de personas que se encuentran en el edificio.

Por lo tanto es correcto asumir que este consumo está asociado a la ocupación del edificio y no a su climatización, sin embargo, los medidores instalados en los equipos de climatización reflejan estos consumos. Debido a esto, existe una discrepancia entre los términos $C_{climareal}$ y C_{HVAC} , correspondientes al consumo de clima medido y estimado respectivamente.

5.1.4.6.2 Consumo fijo

Se observa que para los días de no ocupación el consumo de clima estimado sigue siendo menor al real. Este error, aunque muy inferior al producido por el factor de $C_{ocupación}$, también tiende a infravalorar el consumo de climatización, y se debe a dos circunstancias:

- El sistema de free-cooling con el que cuenta el edificio, que aprovecha las bajas temperaturas exteriores para refrigerar el interior con el objetivo de reducir el consumo de climatización. Este sistema permanece activo durante los meses de más calor, incluso en los días de no ocupación (fines de semana y festivos) y entra en funcionamiento cuando detecta que la temperatura exterior es inferior a la interior, cosa que sucede durante la noche. Este sistema permite mantener una temperatura interior más fresca utilizando únicamente el equipo de ventilación forzada, restando carga de trabajo al equipo de climatización el cual es mucho más intensivo energéticamente.
- El CPD presente en el edificio. La actividad de los servidores que conforman este centro de procesamiento de datos alojado en las instalaciones del Edificio Seminario genera gran cantidad de calor. Para su correcto funcionamiento se refrigera constantemente el aire de la sala en la que están ubicados los servidores.

El valor de C_{fijo} se ha obtenido, siguiendo las pautas indicadas en el TFG en el que se describe el método, identificando un clúster que represente los días de no ocupación del edificio con una temperatura exterior de confort. El valor de C_{fijo} obtenido incluye los consumos de los dos sistemas mencionados. De manera similar a lo sucedido con $C_{ocupación}$, incurrimos en cierto error debido a que los medidores instalados consideran tanto el consumo asociado a la refrigeración del CPD como al mecanismo de free-cooling como consumos de los equipos de climatización.

5.1.4.6.3 Consumo de climatización

La estimación del consumo de climatización mediante la diferencia de los dos términos anteriores y el consumo total real representa la fracción de este consumo que está influenciada

por las variables Radiación y Temperatura. Esta variable no es comparable a la variable medida Cclimareal, que representa el consumo eléctrico total de los equipos de climatización del edificio.

En este estudio se ha llevado a cabo una estimación del consumo desglosado del Edificio Seminario mediante el método de clustering descrito en el Trabajo de Fin de Grado “Desglose Automático de Consumos Energéticos en Edificios Terciarios y Obtención de Líneas Base” [16].

No ha sido posible hacer una prueba adecuada de la validez del método al no disponer de una variable medida comparable a ninguno de los términos obtenidos mediante el desglose.

5.1.5 ESTUDIO 2. Obtención de una línea base del Edificio Seminario

La norma ISO 50001 define la línea base energética como referencia cuantitativa que proporciona la base comparativa de desempeño energético de una organización, es decir, el punto de partida para medir este desempeño [1].

Como se muestra en el capítulo 4 de este TFM “Adecuación Plan Estratégico de Energía y Clima del Ayuntamiento de Zaragoza a la normativa”, Apartados *Planificación Energética* y *Seguimiento y Medición*, las líneas base planteadas en el PEECAZ son insuficientes en cuanto a la totalidad de consumos que monitorizan, no llegando al 10% de la energía total que se consume anualmente en instalaciones del Ayuntamiento de Zaragoza.

Siendo la correcta monitorización de los consumos y la posibilidad de medir el impacto de las inversiones en eficiencia un requisito indispensable para la certificación de un Sistema de gestión de la energía con la norma ISO 50001, se hace necesaria la definición de un método para la obtención de Líneas base energéticas.

Dada la cantidad y variedad de tipologías de los edificios gestionados por el Ayuntamiento, el método a implantar debe reunir una serie de características para ser adecuado a esta problemática:

- Fácil implementación: Deben poderse obtener líneas base para la gran mayoría de los equipamientos en un tiempo razonable
- Adaptabilidad a edificios de diversa configuración: Los equipamientos gestionados por el Ayuntamiento de Zaragoza abarcan colegios, centros cívicos, edificios de oficinas, pabellones deportivos municipales, etc. El método debe ser generalista y aplicable a edificios con usos muy distintos.
- Actualización sencilla: El mantenimiento de las líneas base y su utilización para dimensionar ahorros en consumo energético debe poder ser llevado a cabo sin que ello suponga un gran volumen de trabajo.

Para este caso de estudio se han obtenido LBE del Edificio Seminario mediante los métodos de **clustering** y **regresión lineal simple**. Dado que uno de los edificios para los cuales el Ayuntamiento ya dispone de una Línea base energética es precisamente el Edificio Seminario (Figura 16) se incluye en primer lugar una descripción de ésta. A continuación, se desarrollan los dos métodos que forman parte de este estudio, para terminar con una comparativa de las tres líneas base.

Para comparar la precisión de las líneas base todas ellas se han aplicado a la estimación de los consumos del año 2023, y se han comparado los resultados con los consumos reales medidos de este periodo.

5.1.5.1 Regresión lineal múltiple. PEECAZ

El PEECAZ recoge como tarea de planificación la redacción de un informe de energía anual. Es en la edición de 2021 donde nos encontramos con la línea base energética del Edificio Seminario actualmente en uso, la cual se obtuvo mediante una **regresión lineal múltiple**.

La línea base energética presente en el PEECAZ se obtuvo partiendo de datos de consumo mensuales de 2021.

La metodología aplicada a la obtención de esta LBE comienza por la identificación de las variables relevantes. Los técnicos del ayuntamiento consideraron las variables de Grados-día de calefacción (HDD) y Grados-día de enfriamiento (CDD). La variable grados-día indica cuantos grados y durante cuánto tiempo ha estado la temperatura exterior por debajo (HDD) o por encima (CDD) de cierto valor.

Las temperaturas base para la obtención de los grados día son las establecidas por el Real Decreto-ley 14/2022 en su Artículo 29 en el que se establece el Plan de choque de ahorro y gestión energética en climatización y se definen las temperaturas de consigna:

- a) La temperatura del aire en los recintos calefactados no será superior a 19 °C.
- b) La temperatura del aire en los recintos refrigerados no será inferior a 27 °C.

Estas temperaturas de referencia se utilizan para obtener el valor de las variables de control CDD y HDD, que representan el total mensual de grados día por encima de 27 °C y por debajo de 19 °C, respectivamente.

Mediante una regresión lineal múltiple se obtiene la fórmula que predice el consumo energético mensual utilizando estas dos variables. Esta fórmula constituye la Línea base energética del Edificio Seminario:

$$\text{Consumo mensual (kWh)} = 20.628 + 333 \times \text{HDD (19°C)} + 9.438 \times \text{CDD (27°C)}$$

Con el objetivo de comparar esta línea base con las que se obtienen en las siguientes secciones de este estudio, se obtiene la estimación de consumos del año 2023. Para ello se obtienen las variables CDD y HDD de la página www.degreeedays.net, donde podemos seleccionar las fechas para las cuales nos interesa obtener los datos de grados día y la temperatura base a la que están referidas estas variables.

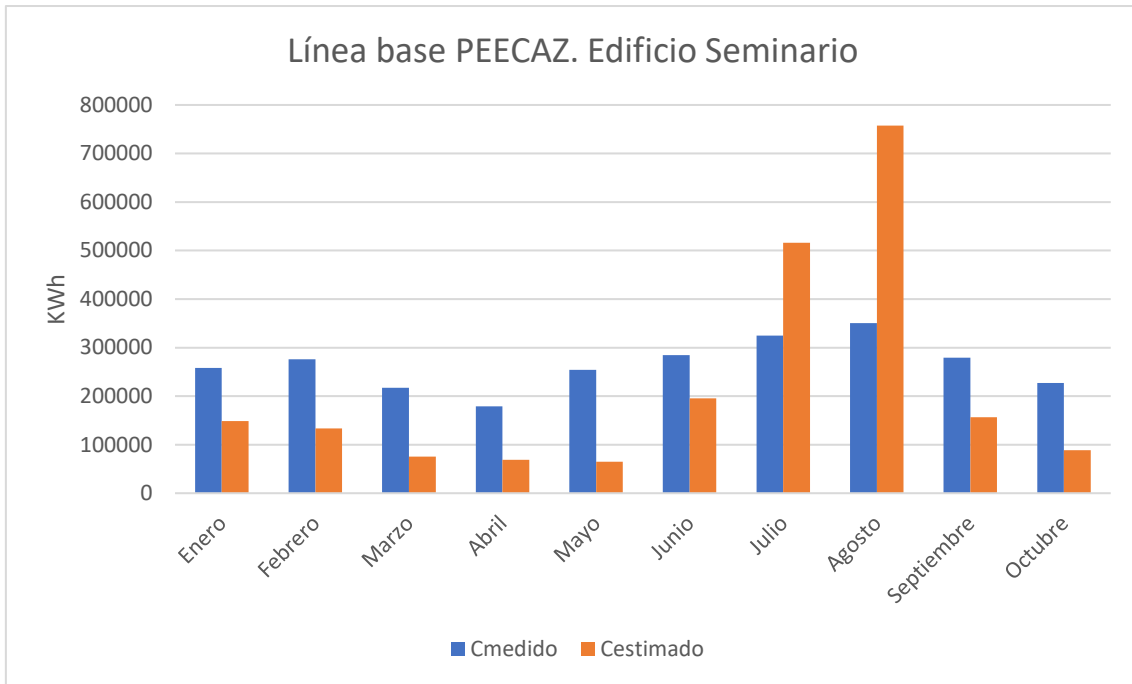


Figura 29 Consumos mensuales Edificio Seminario y LB PEECAZ (2023). CASO1. Estudio 2.

5.1.5.2 Regresión lineal simple

En este bloque se describe el proceso seguido para generar una línea base mediante regresión lineal simple. Se ha partido de los datos diarios de consumo del Edificio Seminario en el año 2022.

El método de regresión lineal simple utilizado tan sólo relaciona linealmente dos variables. Al representar gráficamente en una nube de puntos los consumos energéticos frente a las temperaturas medias diarias, queda claro que ninguna función lineal nos puede ayudar a predecir la variable *Consumo* con estos datos de entrada.

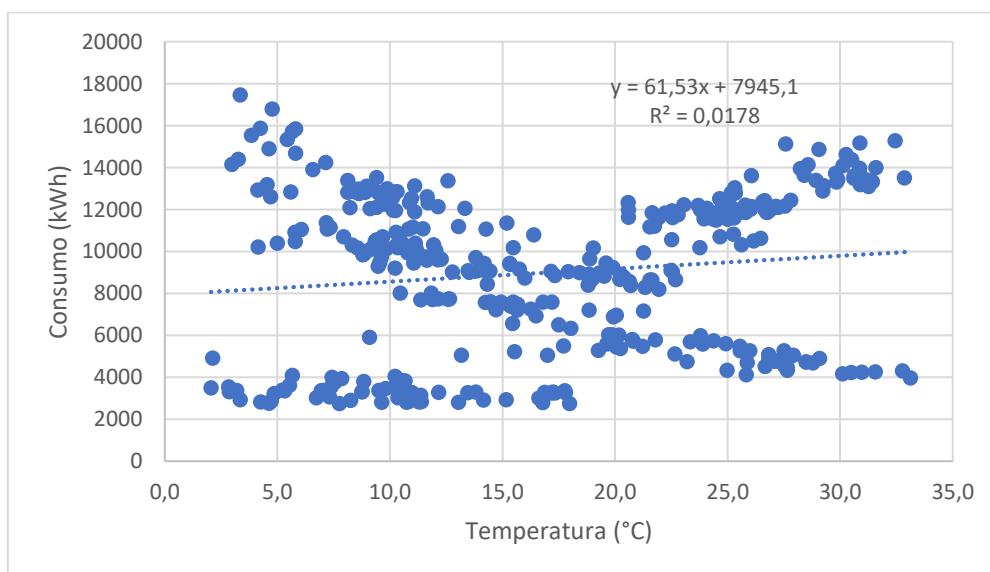


Figura 30 Correlación consumo-temperatura, Edificio Seminario. CASO1. Estudio2. Regresión lineal.

Como se describe en el apartado anterior, en el Informe de energía de 2021 la Unidad de Energía e Instalaciones de Ayto. de Zaragoza aplica la regresión lineal múltiple a todos los datos de entrada, obteniendo una ecuación que relaciona el *consumo* con las variables independientes CDD y HDD.

En este estudio se va a abordar este problema de un modo diferente. Se utiliza una única variable independiente, la temperatura media diaria. Serán los datos de entrada los que se separen para aplicar diferentes regresiones lineales a los grupos de datos que el usuario considere. Atendiendo a la nube de puntos de la Figura 27, resulta evidente que existe una cierta correlación entre consumo y temperatura, sin embargo, parece que la variable temperatura afecte a los consumos diarios de diferentes maneras en base a otras condiciones que no se están teniendo en cuenta. Una agrupación automática de los datos en clústeres ofrece una primera aproximación.

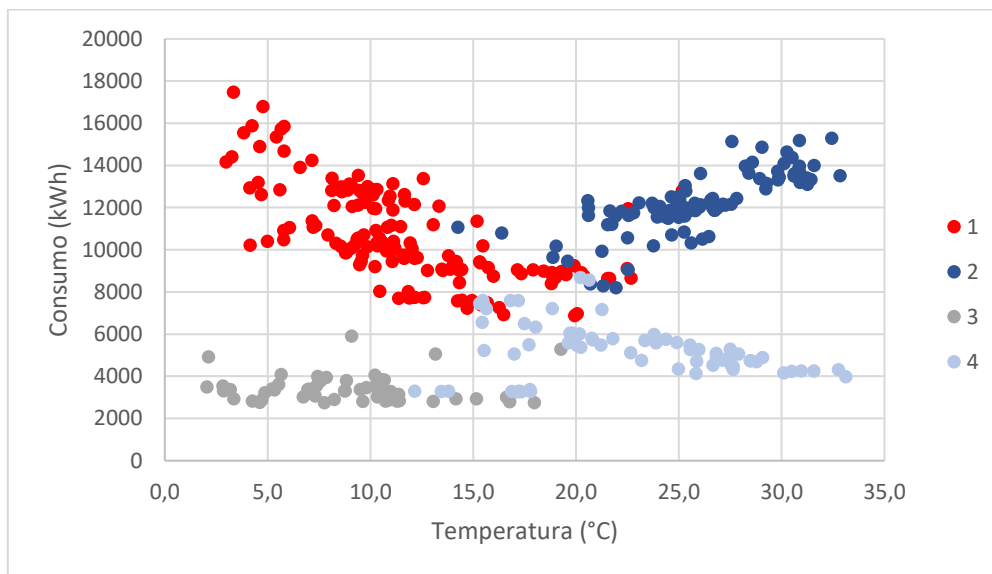


Figura 31 Agrupación automática consumo-temperatura, Edificio Seminario. CASO1. Estudio2. Regresión lineal.

Los clústeres obtenidos podrían utilizarse para generar funciones lineales directamente, haciendo de este un método híbrido de clustering y regresión. En este estudio únicamente se ha utilizado la agrupación automática de la Figura 28 para demostrar la presencia de 4 grupos de datos dentro del espacio de entrada del problema. Estos cuatro grupos de datos se distinguen en cómo la variable *Temperatura* afecta al consumo, en función de la categoría a la que pertenezcan:

- Días en los que el edificio está ocupado y la temperatura es baja (Uso=1, $T \leq 18$): El consumo estará relacionado con el uso de la calefacción, siendo mayor cuanto menor es la temperatura media diaria.
- Días en los que el edificio está ocupado y la temperatura es alta (Uso=1, $T > 18$): En este caso, el consumo dependerá del uso de la climatización para refrigerar el interior.
- Días en los que el edificio no está ocupado y la temperatura es baja (Uso=0, $T \leq 18$): La temperatura no afecta al consumo en este clúster. Este grupo de datos tiene un consumo prácticamente constante.
- Días en los que el edificio no está ocupado y la temperatura es alta (Uso=0, $T > 18$): Existe una cierta dependencia del consumo respecto a la temperatura y se debe al uso del freecooling para refrigerar el edificio.

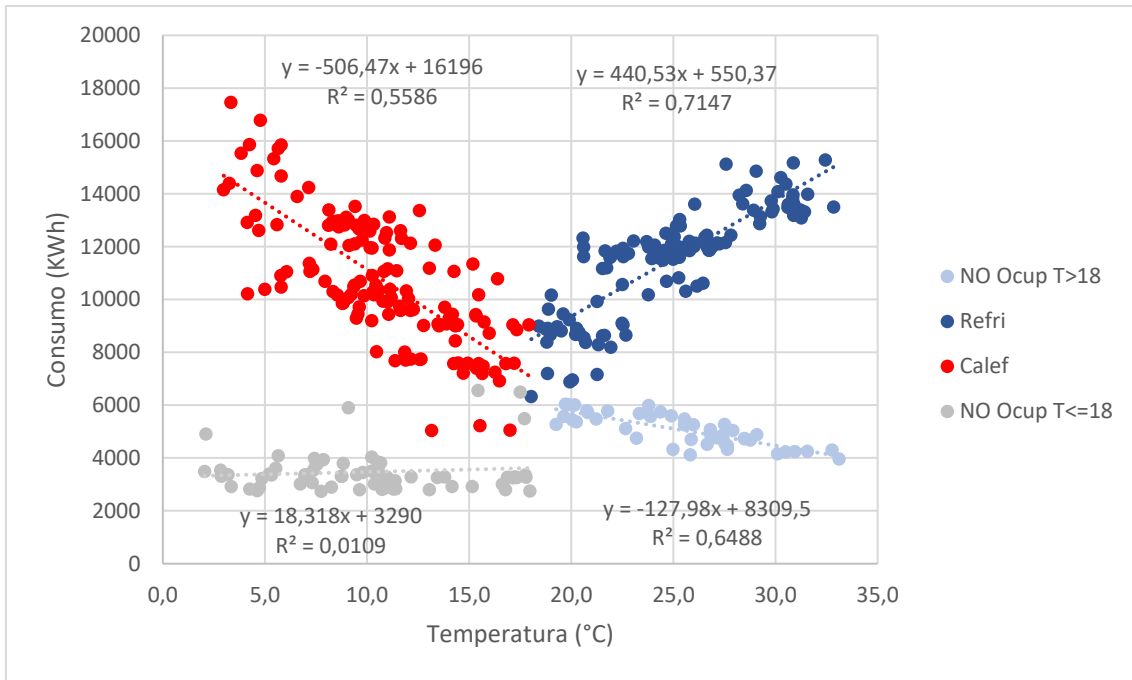


Figura 32 Grupos de datos Edificio Seminario. CASO1. Estudio2. Regresión lineal.

Se ha obtenido la ecuación de la regresión lineal que gobierna el consumo energético de cada uno de estos grupos de datos en función de la variable temperatura.

A la hora de aplicar la línea base a la obtención de una estimación del consumo, se han utilizado condicionales en Excel, de manera que a cada día, en función de los valores de las variables Uso y Temperatura, se le aplica recta de regresión correspondiente al grupo al que pertenece.

CONDICIONES	ECUACIÓN
Uso=0, T>18	$y = -127,98x + 8309,5$
Uso=0, T<=18	$y = 18,318x + 3290$
Uso=1, T>18	$y = 440,53x + 550,37$
Uso=1, T<=18	$y = -506,47x + 16196$

Figura 33 Ecuaciones de las rectas y condiciones. CASO1. Estudio2. Regresión lineal.

A continuación se representan visualmente los valores estimados mediante la LBE frente a los valores reales medidos para el mismo periodo. El error medio mensual cometido es del 9%, siendo el máximo el 18% alcanzado en el mes de abril. Estos resultados se comentarán más en profundidad en la fase de Testing de este estudio (Apartado 5.1.5.4).

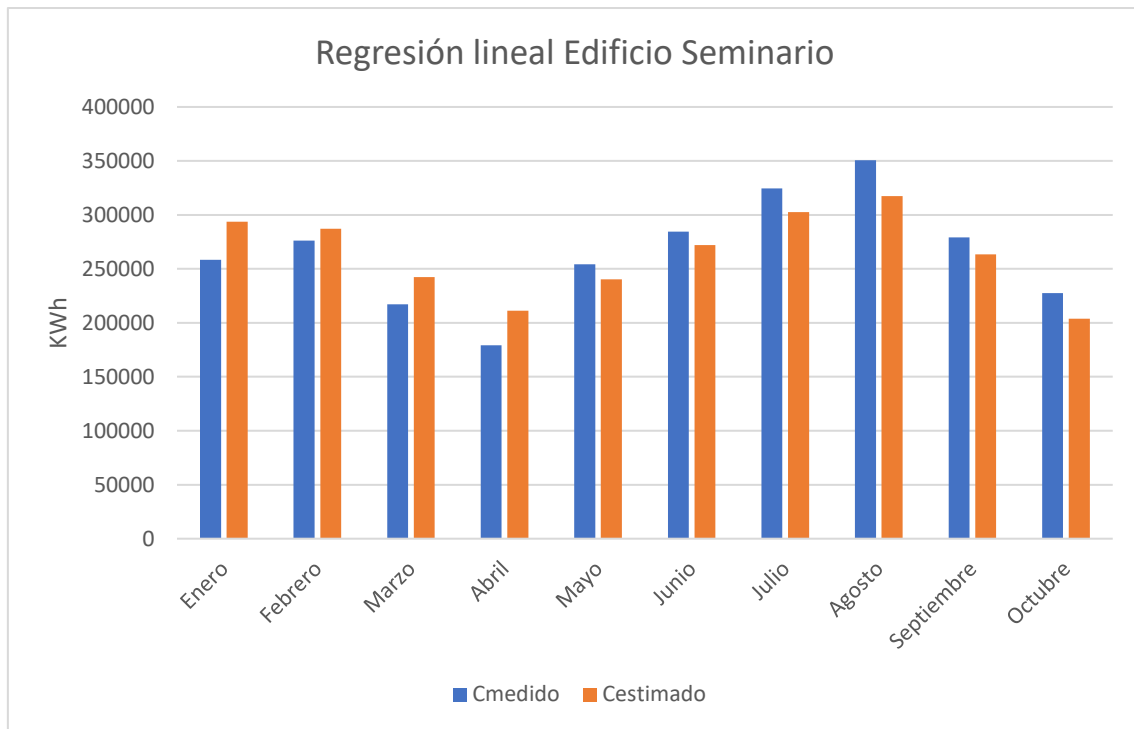


Figura 34 Consumos mensuales Edificio Seminario y Línea Base Regresión lineal (2023). CASO1. Estudio2. Regresión lineal.

5.1.5.3 Clustering

Para este estudio, se ha hecho uso de la agrupación de datos de entrada ya disponible realizada en el capítulo 5.1.4 ESTUDIO1 (Tabla 5) para la obtención de una línea base. Esto es posible gracias a que los límites temporales, así como los criterios empleados para el agrupamiento del espacio de datos de entrada, son los mismos que los aplicados al método de desglose de dicho caso de estudio.

En primer lugar normalizamos las variables Radiación, Temperatura y Consumo del conjunto de datos de entrada. Estos datos de entrada normalizados y tabulados se cargan en Matlab para ser asignados a los 15 clústeres disponibles. De este modo, cada dato de entrada pasa a estar representado por el centroide del clúster al que pertenece, y su consumo estimado será el dato de consumo contenido en el vector que representa dicho centroide.

Fecha	Uso	T	Radiación	Consumo
01/01/2023	0	-0,933	-1,762	-1,820
02/01/2023	0	-1,061	-2,137	-1,789
03/01/2023	1	-1,285	-1,504	0,473
04/01/2023	1	-1,396	-1,443	0,422
05/01/2023	1	-1,258	-1,818	0,560
06/01/2023	0	-1,439	-2,045	-1,636
07/01/2023	0	-1,540	-1,906	-1,781

Tabla 12 Variables Normalizadas. CASO1. Estudio2. Clustering

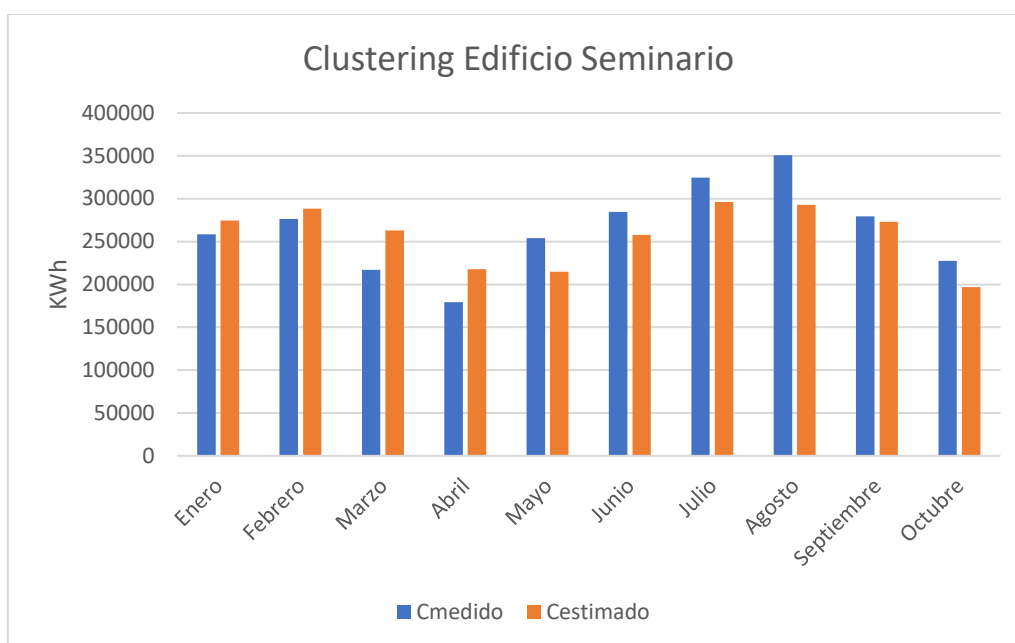


Figura 35 Consumos mensuales Edificio Seminario y Línea Base Clustering (2023). CASO1. Estudio2. Clustering.

5.1.5.4 Testing

Se han aplicado las tres líneas base contempladas en este estudio a la estimación del consumo energético del edificio seminario entre los meses de enero y octubre de 2023. Esto posibilita la comparación de los métodos empleados en términos de precisión de la estimación obtenida.

Mes	Cmedido (kWh)	Cestimado (kWh)			ERROR		
		LB PEECAZ	REG LINEAL	CLUSTERING	PEECAZ	RL	CL
Enero	258.446	148.467	293.598	259.480	43%	14%	0%
Febrero	276.203	133.415	287.072	288.395	52%	4%	4%
Marzo	217.143	75.551	242.332	269.913	65%	12%	24%
Abril	179.291	69.073	211.133	222.533	61%	18%	24%
Mayo	254.138	64.991	240.404	210.167	74%	5%	17%
Junio	284.581	195.308	272.003	257.377	31%	4%	10%
Julio	324.513	515.745	302.432	291.747	59%	7%	10%
Agosto	350.748	757.513	317.330	293.153	116%	10%	16%
Septiembre	279.170	156.312	263.400	279.887	44%	6%	0%
Octubre	227.419	88.910	203.903	193.530	61%	10%	15%
ERROR PROMEDIO MENSUAL					61%	9%	12%
ERROR TOTAL ESTIMACIÓN					17%	1%	3%

Tabla 13 Error de estimación distintas líneas base, Edificio Seminario. CASO 1. Estudio 2.

5.1.5.5 Conclusiones

En este estudio se han obtenido dos líneas base energéticas en base diaria para el edificio Seminario utilizando dos metodologías: Regresión lineal simple (RLS) y clustering. Se ha comparado la precisión de las LBE obtenidas, incluyendo también la Regresión lineal múltiple (RLM) presente en el PEECAZ. Para esta comparación, las tres líneas base se han aplicado a la predicción de los consumos energéticos del edificio Seminario en el mismo marco temporal

(enero-octubre de 2023), y se han comparado los resultados arrojados por los tres modelos con los datos reales de consumo.

En términos de error, tanto la regresión lineal simple como el clustering aplicado en el presente estudio arrojan resultados aceptables, siendo la RLS el método que ofrece las estimaciones más precisas, con un error total de estimación del 1% frente al 3% del Clustering o al 17% de la LB del PEECAZ.

En la Figura 33 se pueden observar gráficamente los resultados de esta comparativa. Llama la atención lo mucho que la línea base del PEECAZ se aleja de los valores de consumo medidos, mientras que las líneas base de Regresión lineal y Clustering ofrecen una estimación satisfactoria de los consumos energéticos del edificio.

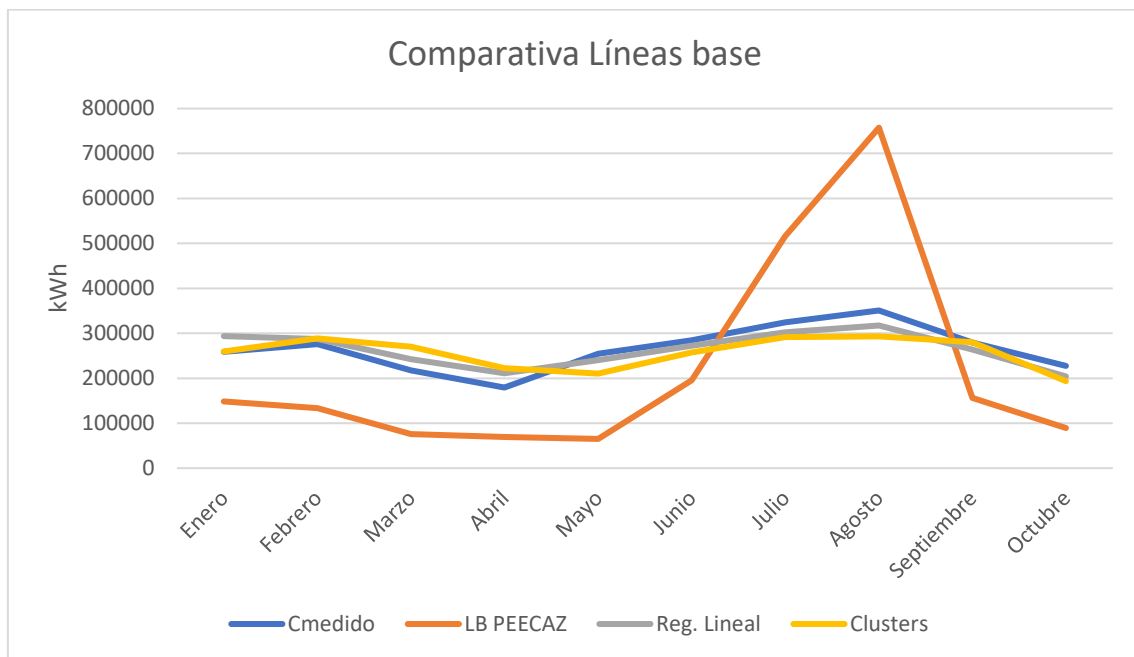


Figura 36 Comparación de distintas líneas base vs. Edificio Seminario (2023). CASO1. Estudio 2.

5.1.5.5.1 Detección de outliers

Las líneas base de este estudio han sido desarrolladas en base temporal diaria, y su conversión a base mensual tiene como objetivo posibilitar la comparación con la LB del PEECAZ. La obtención de estimaciones de consumo diarias posibilita un análisis más en profundidad de los datos obtenidos.

Un ejemplo de esta profundidad de análisis es la detección de valores atípicos en los datos de entrada. Si representamos gráficamente en una nube de puntos los consumos medidos frente a los estimados mediante Regresión lineal se observan una serie de datos que se alejan de la línea de tendencia.

El primero de estos datos anómalos corresponde al domingo 23/07/2023, fecha en la que se celebraron elecciones generales en España. El Edificio Seminario estuvo funcionando como colegio electoral durante esa jornada, lo cual explica el elevado consumo que se produjo respecto a la estimación arrojada por la regresión lineal, que consideró este día como día de no ocupación (Uso = 0). El sistema de climatización fue puesto en marcha ese día para el confort

térmico de las personas que se encontraban dentro pero ¿Cuál es la explicación para el resto de los datos atípicos?

Si nos fijamos en las fechas (Tabla 13), se trata de los domingos de las siguientes 6 semanas a partir del domingo 23/07, y en todos ellos nos encontramos con consumos energéticos muy por encima de lo esperable en días de estas características.

Gracias al análisis llevado a cabo durante el desarrollo de una línea base mediante regresión lineal en base diaria, se pudo averiguar que el sistema de climatización, necesitado de manera puntual para el uso del Edificio Seminario como colegio electoral, se activó automáticamente durante los siguientes domingos, incurriendo en consumos elevados.

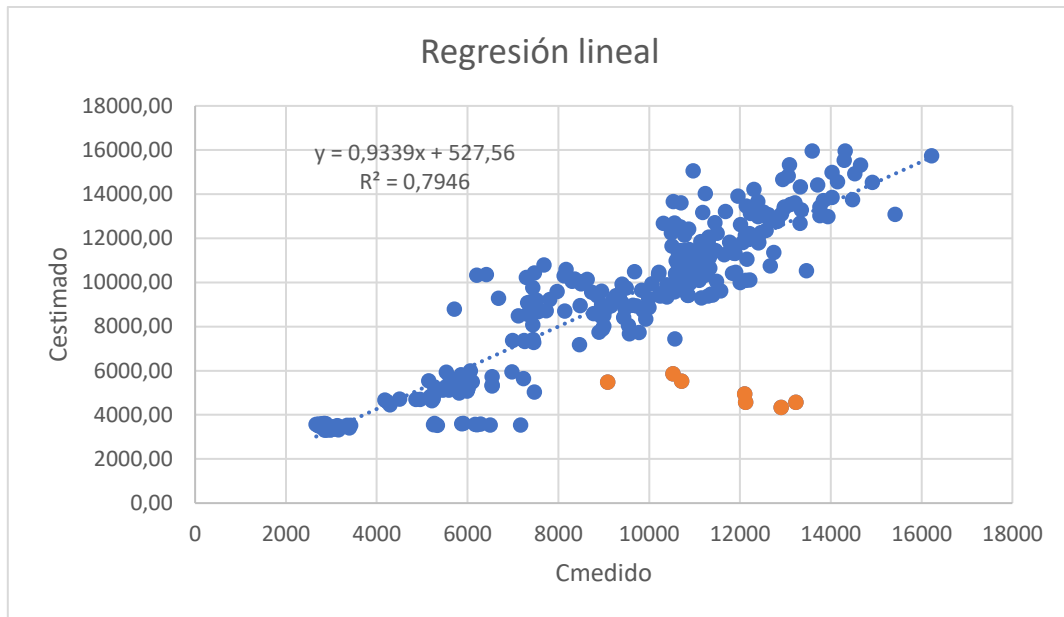


Figura 37 Valores atípicos indicados en naranja. CASO1 Estudio 2.

Fecha	Uso	T (C°)	Cmedido	Cestimado	
23/07/2023	Domingo	0	29,15	13233,60	4578,88
30/07/2023	Domingo	0	26,3	12106,90	4943,63
06/08/2023	Domingo	0	21,7	10714,28	5532,33
13/08/2023	Domingo	0	29,2	12122,46	4572,48
20/08/2023	Domingo	0	31,05	12910,16	4335,72
27/08/2023	Domingo	0	19,06	10524,96	5870,20
03/09/2023	Domingo	0	22,07	9085,07	5484,98

Tabla 14 Conjunto de datos de entrada atípicos. CASO1. Estudio2

5.2 CASO 2: Centro deportivo municipal Palafox

5.2.1 Alcance

En el presente caso de estudio se busca aplicar los métodos de regresión lineal y de clustering a la obtención de líneas base energéticas para el C.D.M. Palafox.

En el caso anterior se vio la aplicación de estos métodos en un edificio administrativo con consumos puramente eléctricos como es el Edificio Seminario. Como se establece en apartados anteriores, el Ayuntamiento de Zaragoza gestiona edificios de muy distinta configuración y uso, y por lo tanto el método para el establecimiento de líneas base que se busca en este trabajo de fin de máster debe ser aplicable a instalaciones con patrones de consumo muy diferentes.

De acuerdo con el PEECAZ, los pabellones deportivos municipales suponen un 18% del consumo energético total de los equipamientos gestionados por el ayuntamiento. Estos centros son, en su conjunto, el segundo tipo de equipamiento que más electricidad consume, por detrás de los edificios de tipo administrativo. También son el segundo tipo más consumidor de gas, por detrás de los centros escolares.

La selección del C.D.M. Palafox como sujeto de este estudio se justifica por las siguientes razones:

- Ejemplo de edificio con un patrón de consumo muy diferente al caso previo, con meses dentro y fuera de temporada.
- Datos de partida de consumo disponibles en base mensual. Se verá la adecuación del método con esta base temporal.
- Dos fuentes de energía: Electricidad y gas natural.
- Pertenencia a la categoría de pabellones deportivos, uno de los tipos de equipamiento más intensivos energéticamente.

5.2.2 Emplazamiento

Las instalaciones se encuentran en el Casco Histórico de Zaragoza, en los locales del edificio de viviendas ubicado la intersección de las calles Agustina de Aragón y Mayoral y disponen de la siguiente orientación y planta:

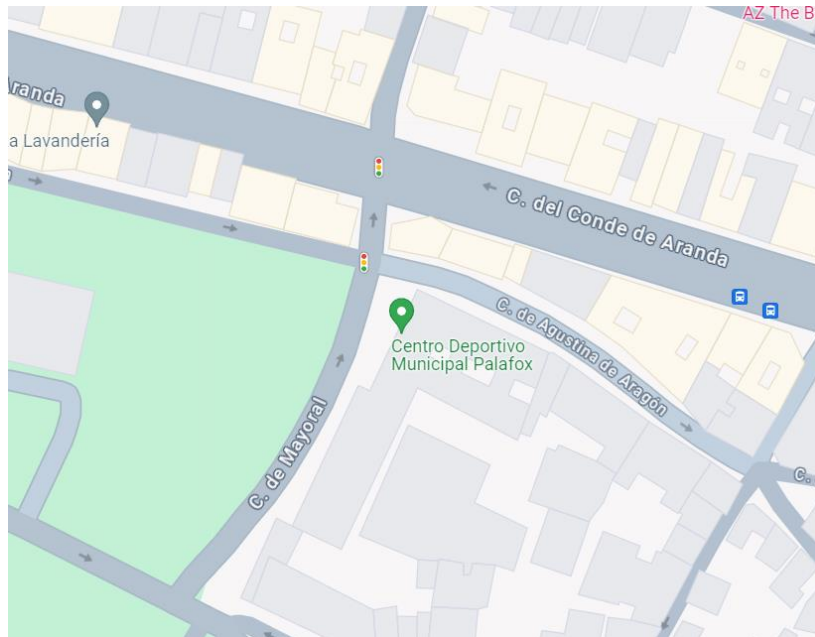


Figura 38 Emplazamiento CDM Palafox. fuente: Google maps

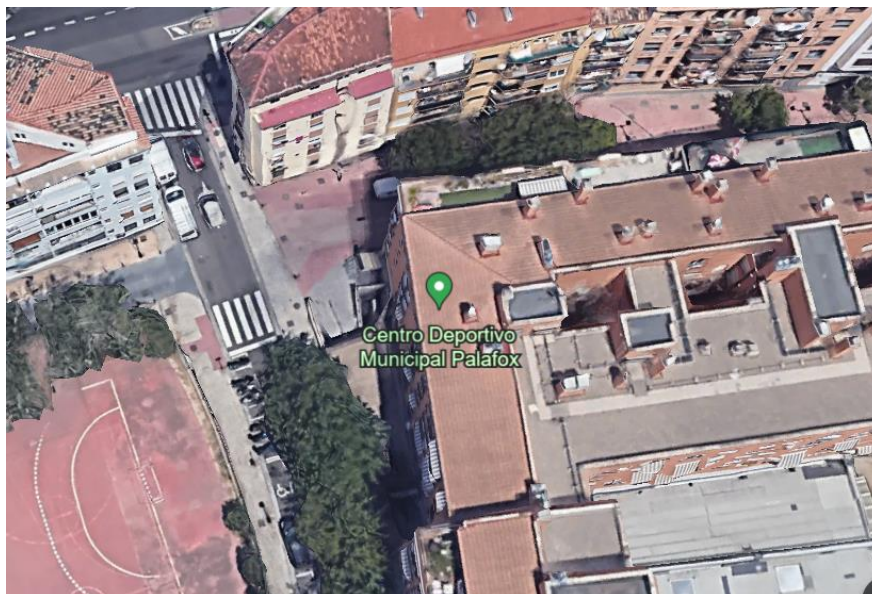


Figura 39 Modelo 3D CDM Palafox. Fuente: Google Earth

5.2.3 Análisis de consumos del edificio a estudio

El centro dispone de vasos de piscina climatizada, jacuzzi, vestuarios, almacenes, sala polivalente y oficinas. Estas instalaciones abren durante la temporada que va desde septiembre hasta junio, y permanece cerrada durante los meses de julio y agosto.

Entre los principales consumidores de energía eléctrica de la instalación están los equipos de climatización de las distintas estancias y sistemas de iluminación. Una caldera de gas natural abastece de agua caliente sanitaria al edificio.

Para llevar a cabo la caracterización energética de este edificio se deben de tener en cuenta los consumos de las dos fuentes de energía que lo abastecen: electricidad y gas. Un modelo capaz de predecir los consumos de gas y de electricidad por separado resulta más interesante que uno diseñado para estimar el consumo en su conjunto. Una línea base que estima los consumos de las distintas fuentes de energía permite al usuario obtener más información sobre los ahorros conseguidos tras la implementación de una cierta medida de ahorro energético.

5.2.4 Datos de entrada

Los datos históricos de consumo se han tomado de la plataforma SIARQ, donde están disponibles las facturas energéticas de las distintas instalaciones el Ayuntamiento de Zaragoza desde el año 2012. A pesar de disponer de datos de consumo eléctrico diario, la única base temporal disponible para los consumos de gas es mensual (facturas), de modo que para el análisis conjunto de la energía se ha utilizado la base mensual. Cuando se hable de *consumo*, sin especificar la fuente de energía, se está haciendo referencia al consumo total del edificio.

5.2.4.1 Límites temporales

El conjunto de años para los que se dispone de datos de consumo va desde 2012 a 2023. La pandemia de Covid-19 afectó a la utilización de los pabellones deportivos municipales, provocando su cierre o limitaciones en el aforo a lo largo de los años 2020 y 2021. Se ha comprobado que la adición de datos de estos años anómalos al espacio de datos de entrada disminuye la correlación entre los consumos y las distintas variables consideradas.

En el presente caso a estudio se desarrollan dos líneas base, una mediante regresión lineal simple y otra mediante el método de clustering, siendo ambas definidas a partir de datos de 2012 a 2018. A continuación, se prueba la precisión de ambos modelos con los datos de consumo del año 2019.

5.2.4.2 Variables

Se han considerado variables meteorológicas como *Radiación solar*, *Temperatura media* y también la variable *Usuarios*.

- Gas: Consumo de gas mensual obtenido de las facturas, en kWh.
- Electricidad: Consumo eléctrico mensual obtenido de las facturas, en kWh.
- Consumo: Consumo mensual total, suma de los dos términos anteriores. Expresado en unidades de kWh.
- Temperatura: Temperatura media diaria, a 2 metros del suelo. Variable obtenida de la base de datos de la NASA y medida en °C. En adelante
- Radiación: Radiación solar horizontal en la ubicación del edificio. Obtenida de la base de datos de la NASA y medida en kWh/m²/día.
- Usuarios: Recuento mensual de los usuarios que acceden, llevado a cabo por la plantilla del pabellón deportivo.

A continuación se muestra un extracto de la tabla con los datos de entrada del problema:

FECHA	CONSUMOS			METEOROLOGÍA		USUARIOS
	ELECTRICIDAD	GAS	CONSUMO	T2M	RADIACIÓN	
2013 Enero	91.672	29.535	121.207	6,5	2,3	15.906
2013 Febrero	84.625	27.398	112.023	5,9	3,2	17.253
2013 Marzo	87.132	24.753	111.885	9,7	4,15	15.516
2013 Abril	79.401	22.212	101.613	12,2	5,42	16.127
2013 Mayo	81.292	19.671	100.963	13,4	6,59	17.295
2013 Junio	67.861	17.074	84.935	19,1	7,21	12.071
2013 Julio	12.096	7.756	19.852	25,7	7,37	0
2013 Agosto	19.585	5.766	25.351	23,7	6,46	0
2013 Septiembre	67.343	11.980	79.323	20,6	5,3	8.018
2013 Octubre	79.307	17.656	96.963	17,1	3,68	15.611
2013 Noviembre	83.390	19.290	102.680	8,6	2,48	15.112
2013 Diciembre	85.571	22.940	108.511	5,6	1,85	10.419
2014 Enero	93.070	25.080	118.150	7,7	1,98	13.931

Tabla 15 Fragmento datos de partida. CASO2.

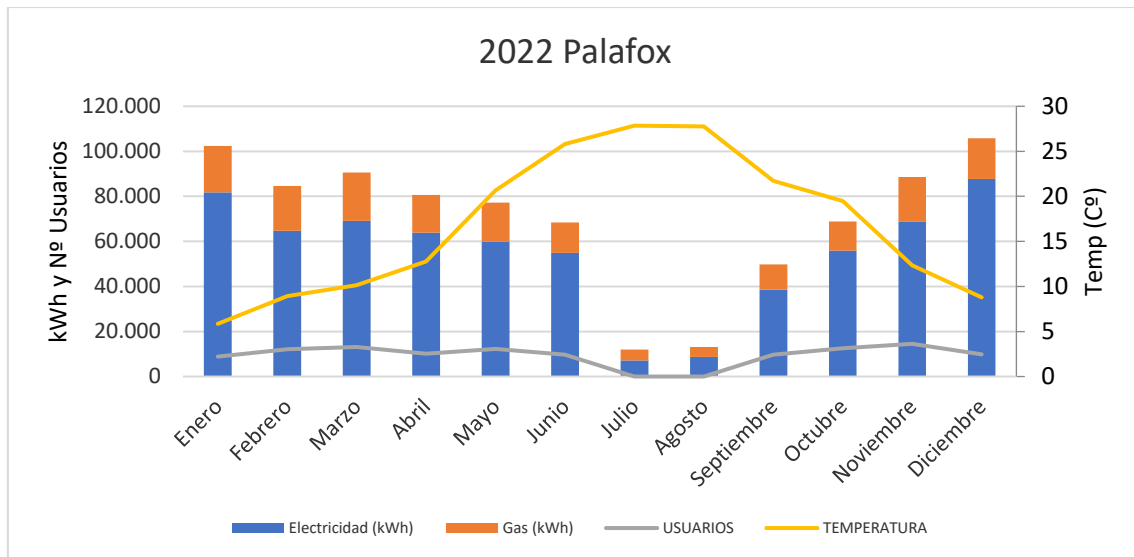


Figura 40 Representación variables, año 2022. CASO2.

5.2.5 Regresión lineal

En el CASO1. Estudio 2 se hacía uso de un análisis preliminar del espacio de datos de entrada para hallar condicionales sencillos que nos permitan generar distintas funciones de regresión lineal. De manera análoga, en este caso de estudio se han agrupado los datos entre los que pertenecen a meses de la Temporada de apertura al público de las instalaciones y aquellos que no.

La variable Temperatura la que muestra una mayor correlación con el consumo y por lo tanto la que se ha seleccionado para generar la regresión lineal simple.

R^2	TEMPERATURA	USUARIOS	RADIACIÓN
CONSUMO	0,7398	0,1738	0,4
GAS	0,5904	0,2757	0,1626
ELECTRICIDAD	0,6117	0,0852	0,4402

Tabla 16 Correlación variables de entrada. CASO2. Regresión lineal.

Se han generado las funciones lineales que relacionan los consumos de gas y electricidad con la temperatura para los meses correspondientes a la Temporada. Los meses de julio y agosto, los de fuera de temporada, ofrecen datos de consumo muy similares entre ellos y no dependientes de ninguna variable, de modo que se ha optado por considerarlos un clúster. Por tanto, para un mes de estas características el consumo estimado es la media de los consumos de los meses fuera de temporada obtenida de los datos de entrada.

FUENTE	TEMPORADA	FUERA TEMPORADA
ELECTRICIDAD	$y = -1374,3x + 93286$	$y = 13988$
GAS	$y = -690,36x + 30644$	$y = 5701$

Tabla 17 Ecuaciones de las rectas y condiciones. CASO2. Regresión lineal.

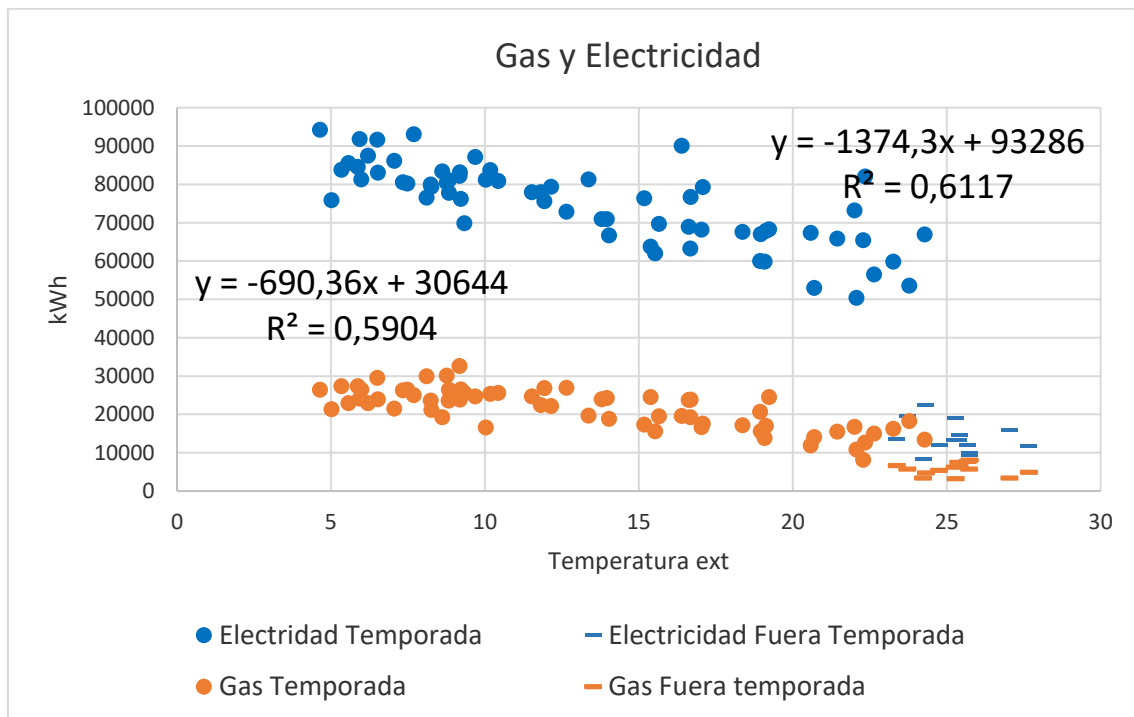


Figura 41 Regresiones de gas y electricidad. CASO2. Regresión lineal.

5.2.6 Clustering

En este estudio, se ha utilizado el método K-means para reducir la dimensionalidad del espacio de datos de entrada. Cada dato de entrada contiene el valor correspondiente a un mes de cada una de las variables consideradas. Estas variables (usuarios, temperatura, radiación, consumo de

gas y eléctrico) son todas ellas numéricas y deben ser normalizadas antes de aplicar el método de clustering.

Usuarios	T	Rad	Elec	Gas
0,777419	-1,24528	-1,18444	1,054065	1,389691
1,018028	-1,33804	-0,73402	0,76806	1,10599
0,707755	-0,78437	-0,25858	0,869807	0,754849
0,816895	-0,42783	0,377019	0,556042	0,417514
1,02553	-0,251	0,962567	0,632789	0,080179
0,092389	0,583837	1,272857	0,087687	-0,26459

Tabla 18 Variables de entrada normalizadas. CASO2. Clustering.

Para poder aplicar el algoritmo K-means es necesario un conjunto de datos de entrada y un número de clústeres definido por el usuario. Se ha seleccionado el número óptimo de clústeres de entrada al algoritmo siguiendo el criterio de minimizar el índice de Davies-Bouldin, obteniendo 29 clústeres y un índice de DB de 0,745.

El resultado de la aplicación del algoritmo K-means con las condiciones comentadas un conjunto de 29 clústeres del cual se muestra un fragmento a continuación, ya con las variables numéricas convertidas a sus unidades.

Cluster	Usuarios	T	Rad	Elec	Gas
1	16105	6	3	86705	28095
2	0	28	7	11657	4902
3	14079	24	7	66943	13464
4	15203	18	4	67959	16966
5	14268	13	6	71586	25050

Tabla 19 Fragmento conjunto clústeres. CASO2. Clustering.

5.2.7 Testing

Con el objetivo de comparar las predicciones arrojadas por los dos modelos, ambos han sido aplicados a la obtención de los consumos de electricidad y gas del año 2019. Los datos de entrada de que se dispone son las mismas variables utilizadas para generar los modelos de las líneas base, para cada mes del año 2019.

Mes	Usuarios	T	Rad
2019 Enero	13053	5	2,3
2019 Febrero	15237	8	3,8
2019 Marzo	15074	11	5,2
2019 Abril	12972	12	5,2
2019 Mayo	15396	16	7,2
2019 Junio	11863	23	7,7
2019 Julio	0	27	7,3
2019 Agosto	0	26	6,5
2019 Septiembre	9531	21	5,2
2019 Octubre	14419	17	3,6
2019 Noviembre	14449	10	2,4
2019 Diciembre	10716	9	1,7

Tabla 20 Conjunto de datos de testing. CASO2. Clustering.

Para el caso de la regresión lineal, se ha tomado únicamente la variable temperatura así como las fórmulas obtenidas en el apartado Regresión Lineal para obtener los consumos de gas y electricidad.

MES	Temp	Elec		Gas	
		Real	RL	Real	RL
2019 Enero	5	88019	86277	24978	27123
2019 Febrero	8	72200	81632	26478	24790
2019 Marzo	11	74235	78031	22882	22981
2019 Abril	12	68541	76313	24096	22118
2019 Mayo	16	67398	70885	20194	19391
2019 Junio	23	58211	61512	17325	14683
2019 Julio	27	7599	13988	9116	5701
2019 Agosto	26	12365	13988	7251	5701
2019 Septiembre	21	58904	64247	14270	16057
2019 Octubre	17	73375	70157	19728	19025
2019 Noviembre	10	75981	79859	21616	23899
2019 Diciembre	9	77171	81110	18675	24527

Tabla 21 Regresión lineal testing. CASO2. Clustering.

Para el clustering, es necesario generar una matriz con los valores de las variables para cada dato de entrada. Las variables utilizadas para generar el conjunto de clústeres son las mismas que se deben utilizar para la asignación de los datos. A continuación se ha procedido a ejecutar un algoritmo que asigna cada dato de entrada al clúster con cuyo centroide tenga una menor distancia euclídea. Los consumos de gas y electricidad de cada mes se estiman como los correspondientes al clúster al que ese mes ha sido asignado.

MES	Usuarios	Temp	Rad	Cluster	Elec		Gas	
					Real	Cluster	Real	Cluster
2019 Enero	13053	5	2,3	18	88019	93045	24978	25205
2019 Febrero	15237	8	3,8	28	72200	78289	26478	27142
2019 Marzo	15074	11	5,2	22	74235	81865	22882	25658
2019 Abril	12972	12	5,2	5	68541	71586	24096	25050
2019 Mayo	15396	16	7,2	19	67398	71336	20194	24109
2019 Junio	11863	23	7,7	8	58211	56555	17325	14989
2019 Julio	0	27	7,3	13	7599	11701	9116	6912
2019 Agosto	0	26	6,5	6	12365	13367	7251	6550
2019 Septiembre	9531	21	5,2	21	58904	69099	14270	13527
2019 Octubre	14419	17	3,6	29	73375	75149	19728	18181
2019 Noviembre	14449	10	2,4	16	75981	82326	21616	17938
2019 Diciembre	10716	9	1,7	20	77171	81664	18675	22525

Tabla 22 Clustering testing. CASO2. Clustering.

5.2.8 Conclusiones

Se han obtenido estimaciones de los consumos mensuales del año 2019 de gas y electricidad del centro deportivo municipal Palafox de Zaragoza. Estas líneas base energéticas se han obtenido mediante el método de regresión lineal y un algoritmo de clustering, respectivamente.

El error obtenido para la estimación del consumo de cada fuente de energía y método de obtención de la LB se muestra a continuación.

ELECTRICIDAD	CONSUMO			EROR (%)		
	Mes	REAL	RL	CL	RL	CL
2019 Enero		88019	86277	93045	2	6
2019 Febrero		72200	81632	78289	13	8
2019 Marzo		74235	78031	81865	5	10
2019 Abril		68541	76313	71586	11	4
2019 Mayo		67398	70885	71336	5	6
2019 Junio		58211	61512	56555	6	3
2019 Julio		7599	13988	11701	84	54
2019 Agosto		12365	13988	13367	13	8
2019 Septiembre		58904	64247	69099	9	17
2019 Octubre		73375	70157	75149	4	2
2019 Noviembre		75981	79859	82326	5	8
2019 Diciembre		77171	81110	81664	5	6
ERROR MEDIO MENSUAL					13,6	11,1
ERROR TOTAL ESTIMACIÓN					6,0	7,1

Tabla 23 Error de estimación Electricidad. CASO 2. CDM Palafox.

GAS Mes	CONSUMO			EROR (%)	
	REAL	RL	CL	RL	CL
2019 Enero	24978	27123	25205	9	1
2019 Febrero	26478	24790	27142	6	3
2019 Marzo	22882	22981	25658	0	12
2019 Abril	24096	22118	25050	8	4
2019 Mayo	20194	19391	24109	4	19
2019 Junio	17325	14683	14989	15	13
2019 Julio	9116	5701	6912	37	24
2019 Agosto	7251	5701	6550	21	10
2019 Septiembre	14270	16057	13527	13	5
2019 Octubre	19728	19025	18181	4	8
2019 Noviembre	21616	23899	17938	11	17
2019 Diciembre	18675	24527	22525	31	21
ERROR MEDIO MENSUAL				13,3	11,4
ERROR TOTAL ESTIMACIÓN				0,3	0,8

Tabla 24 Error de estimación Gas. CASO 2. CDM Palafox.

Los errores obtenidos mes a mes se mantienen por debajo del 20% por lo general, lo cual es un buen resultado y se da por aceptable el ajuste obtenido con la estimación realizada.

Es notable el error obtenido para el mes de julio, tanto en lo que se refiere a electricidad como a gas. Esto es normal puesto que julio de 2019 fue un mes anómalo en cuanto a consumos comparado con los de los años previos, utilizados para alimentar el modelo. A esto se suma que los meses fuera de temporada son los que presentan los consumos más bajos de todo el año, y los menos dependientes de variables climáticas.

6 CONCLUSIONES

La realización de este trabajo ha permitido la comprensión de la importancia de la gestión energética en los Ayuntamientos.

Se ha hecho un repaso de los contenidos del Plan Estratégico de Energía y Clima del Ayuntamiento de Zaragoza, comparando sus contenidos con las directrices recogidas en la normativa en sistemas de gestión energética. La ausencia de líneas base adecuadas imposibilita la cuantificación del ahorro energético conseguido tras la implantación de una medida de ahorro energético.

Se ha constatado la necesidad de implantación de métodos de seguimiento de consumos energéticos en los equipamientos gestionados por el Ayuntamiento de Zaragoza. La ausencia de equipos de medición en los diferentes sistemas presentes en los edificios obliga a plantear que partan de los consumos totales del edificio a estudio.

El consumo de climatización es especialmente relevante en la mayoría de los edificios terciarios, constituyendo más de la mitad del consumo total en muchas ocasiones. Se ha aplicado la metodología descrita en “Desglose Automático de Consumos Energéticos en Edificios Terciarios y Obtención de Líneas Base” [16] con el objetivo de obtener un desglose estimado de los consumos del Edificio Seminario, con especial énfasis en el término de consumo de clima. Se ha visto que el método no es adecuado dado que las estimaciones obtenidas no se ajustan a la realidad del funcionamiento del edificio.

Se ha estudiado la aplicación de dos metodologías a la obtención de líneas base energéticas de dos edificios de distinta configuración y uso, un edificio de tipo administrativo y un pabellón deportivo con piscina climatizada. La precisión de las estimaciones arrojadas tanto por el método de Regresión lineal como por el método de clustering son aceptables.

Para decidir si una estimación del consumo es aceptable o no, el criterio empleado ha sido el error numérico cometido. Dado que las dos metodologías estudiadas cumplen satisfactoriamente con este criterio, cabe plantearse cuál es la más adecuada para su implantación en el Ayuntamiento de Zaragoza.

Por un lado, la regresión lineal es menos exigente que el clustering en cuanto a **variables de entrada**. Esto es debido a que la *temperatura media diaria* ha demostrado ser la variable que presenta mayor correlación con el consumo de los edificios, y por tanto bastaría con obtener los valores de esta variable (de la página web de la NASA, por ejemplo), y los consumos energéticos para aplicar el método de regresión lineal. Para el método de clustering, la precisión aumenta al incorporar otras variables meteorológicas adicionales [16].

Otro aspecto para tener en cuenta es el **software requerido y el coste computacional** del método. De nuevo, el método de regresión lineal es mucho menos exigente que el de clustering en este aspecto. Basta una hoja Excel para obtener la ecuación de la recta y ser capaces de aplicar la regresión lineal, sin embargo, el método de clustering se lleva a cabo a través de un entorno más avanzado como lo es Matlab. Generar y asignar los clústeres en Matlab requiere de un cierto trabajo de programación. La recta de regresión se obtiene de manera inmediata, mientras que el cálculo del clustering requiere de un cierto tiempo al tratarse de un método iterativo.

El último aspecto por considerar sería el de el **análisis previo de los datos de entrada**. Si bien la visualización de los datos por parte del usuario del método siempre es beneficiosa para detectar

cualquier anomalía, es bueno recordar que se busca un método con el objetivo de aplicarlo a la obtención de LBEs de un total de 820 equipamientos, de diferente usos y perfiles de consumo. El método de clustering se tiene la cualidad de detectar patrones o relaciones ocultas en grandes volúmenes de datos. La regresión lineal no realiza esta tarea de detección de patrones. Pretender aplicar la regresión lineal a todos los datos de entrada sin distinción, estableciendo una recta consumo-temperatura, reduciría drásticamente la precisión del proceso. La regresión lineal, por tanto, obliga al técnico encargado de su aplicación a realiza un análisis preliminar de los datos de entrada para distinguir grupos de datos para los cuales la relación entre las variables de entrada y salida son diferentes. Una vez hecho esto, el usuario deberá decidir cuántas líneas de regresión diferentes se generarán e introducir manualmente los condicionales a aplicar (días de uso/no uso, meses de temporada/fuera de temporada, días de frío/calor...).

Se recomienda la metodología de regresión lineal simple para la generación de líneas base de los equipamientos gestionados por el Ayto. de Zaragoza. El método de clustering se ofrece a su vez como una alternativa interesante para este fin.

REFERENCIAS

- [1] Javier María, R. H., Francisco Javier, R. M., & Eloy, V. G. (2018). Eficiencia energética de los edificios. Sistema de gestión energética ISO 50001. Auditorías energéticas. Ediciones Paraninfo, S.A.
- [2] Haberl, Jeff & Claridge, David & Culp, C. (2005). ASHRAE's Guideline 14-2002 for Measurement of Energy and Demand Savings: How to Determine What Was Really Saved by the Retrofit.
- [3] M&V Guidelines: Measurement and Verification for Performance-Based Contracts. Version 4.0. 2015
- [4] UNE-EN ISO 50001:2018 - Energy Management Systems: Requirements with Guidance for Use. (2018).
- [5] ISO 50002 - Energy Audits: Requirements with guidance for use. (2014).
- [6] UNE-ISO 50003:2018 - Sistemas de gestión de la energía: Requisitos para organismos que realizan auditoría y certificación de sistemas de gestión de la energía. (2018)
- [7] ISO 50004:2020 - Energy management systems - Guidance for the implementation, maintenance and improvement of an energy management system," pp. 1–45, (2020)
- [8] ISO 50006, "Energy management systems — Measuring energy performance using energy baselines (EnB) and energy performance indicators (EnPI) — General principles and guidance," vol. 44, no. 0, 2014.
- [9] I. 50015, "Energy management systems — Measurement and verification of energy performance of organizations — General principles and guidance," vol. 2014, 2014.
- [10] V. Shabunko, C.M. Lim, S. Mathew. EnergyPlus models for the benchmarking of residential buildings in Brunei Darussalam. 2018.
- [11] M. Khoshbakht, Z. Gou, K. Dupre. Energy use characteristics and benchmarking for higher education buildings. 2018.
- [12] B. Dong, C. Cao, S. E. Lee. Applying support vector machines to predict building energy consumption in tropical región. 2005.
- [13] Q. Li, Q. Meng, J. Cai, H. Yoshino, A. Mochida. Predicting hourly cooling load in the building: A comparison of support vector machine and different artificial neural networks. 2009.
- [14] C. Deb, L. S. Eang, J. Yang, M. Santamouris. Forecasting diurnal cooling energy load for institutional buildings using Artificial Neural Networks. 2016.
- [15] J. H. Ko, D. S. Kong, J. H. Huh. Baseline building energy modeling of cluster inverse model by using daily energy consumption in office buildings. 2017.
- [16] Harana Martín-Arroyo, A. (2019) Desglose Automático de Consumos Energéticos en Edificios Terciarios y Obtención de Líneas Base [Trabajo Fin de Grado, Universidad de Sevilla]