

Edición especial 25 años del doctorado en ingeniería

Metodologías para la evaluación de la eficiencia energética en edificaciones universitarias. Revisión literaria

Methodologies for the evaluation of energy efficiency in university buildings. Literature review

Cómo citar: Araujo-Vadiel, A.V., Mejía-Carmona, D.F., González-Salcedo, L.O. Metodologías para la evaluación de la eficiencia energética en edificaciones universitarias. revisión literaria. Ingeniería y Competitividad. 25(4), e-30313080. doi: 10.25100/iy.c.v25i4.13080

Andrea V. Araujo-Badiel¹, Diego F. Mejía-Carmona¹,
Luis O. González-Salcedo¹

¹Facultad de Ingeniería y Administración, Universidad Nacional de Colombia Sede Palmira

Resumen

Diversos factores, así como el uso y tipo de actividades que se desarrollan en las edificaciones, tienen un rol importante en su eficiencia y comportamientos energéticos. La consideración y conocimiento de estos factores, usos y actividades son necesarias para proponer acciones que ayuden a mejorar su desempeño energético y aplicar soluciones integradas a sus necesidades. Diversas metodologías se emplean para evaluar el comportamiento y eficiencia energética de los mismos. Sin embargo, para las edificaciones universitarias las metodologías convencionales requieren ser ajustadas para su correcta aplicación. Esta contribución presenta una revisión literaria sobre las metodologías para la evaluación de la eficiencia energética en edificaciones universitarias, la cual fue llevada a cabo usando una metodología orientada hacia los análisis bibliográfico y bibliométrico, respectivamente. La revisión permitió concluir que las metodologías para tal fin corresponden principalmente a auditorías, modelación y simulación, evaluaciones comparativas, y mediciones avanzadas.

Palabras claves: Eficiencia Energética, Edificaciones universitarias, consumo energético, desarrollo sostenible.

Abstract

Various factors, as well as the use and type of activities carried out in buildings, play an important role in their efficiency and energy behavior. The consideration and knowledge of these factors, uses and activities are necessary to propose actions that help improve their energy performance and apply integrated solutions to their needs. Various methodologies are used to evaluate their behavior and energy efficiency. However, for university buildings, conventional methodologies need to be adjusted for their correct application. This contribution presents a literary review on the methodologies for the evaluation of energy efficiency in university buildings, which was carried out using a methodology oriented towards bibliographic and bibliometric analysis, respectively. The review allowed us to conclude that the methodologies for this purpose correspond mainly to audits, modeling and simulation, comparative evaluations, and advanced measurements.

Keywords: Energy Efficiency, University buildings, energy consumption, sustainable development.



Introducción

La crisis ambiental es el resultado de la actividad humana que ejerce presión constante sobre la sustentación ecosistémica, además de enfocarse en un crecimiento tecnológico y el uso de combustibles fósiles como base de la economía energética mundial, como forma de representar el poder político (1-3). En Colombia el consumo de energía se categoriza por sectores (4) a saber: transporte (40.2%), industrial (28.9%), residencial (16.5%) y el comercial y público que incluye a las instituciones de educación superior - IES (7%); la ineficiencia en dicho consumo es del orden del 67%, con una energía útil del 31% de la energía final (5). Las fuentes primarias que generan la energía para cubrir la demanda nacional están estrechamente relacionadas con las actividades que se realizan en cada uno de los sectores.

Para el sector residencial, el comercial y público, los usos de la energía están dados por la eléctrica y el gas natural, y de acuerdo con el Plan de Acción Indicativo de Eficiencia Energética de la UPME (5), se distribuye en iluminación (31%), aire acondicionado (22.8%), refrigeración (13.9%), fuerza motriz (12.4%), equipos de oficina (8.8%), calor indirecto (9.0%), calor directo (7.7%), y en otros (2.4%).

Según el Banco Mundial en 2019, más de la mitad de la población mundial vivía en ciudades (55.7%), es decir 4,274 millones de personas, y se proyecta que este porcentaje aumentará al 60% en el 2030 (6). El consumo de energía tiene una correlación directa con el aumento de la población, su desarrollo económico, estilo de vida, y acceso de tecnología (7-8). Las tendencias demográficas y económicas (9), pronostican que para el 2040 la población mundial llegue a 9,000 millones de habitantes, lo cual representa un impulso en la demanda mundial de energía de aproximadamente un 30%.

Teniendo en cuenta el aumento de la población y la demanda de recursos para vivienda se ha estimado el impacto que tiene el desarrollo de este tipo de proyectos, según el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente – UNEP, la operación y construcción de edificios producen el 38% de todas las emisiones de CO₂ relacionadas con la energía, que también están relacionadas con la interacción que tienen estos con su entorno, y que también vienen dadas por el intercambio de calor y características que influyen en su comportamiento térmico tales como: forma, volumen, orientación, localización geográfico, distribución espacial, materiales de construcción, color de la fachada, tamaño de ventanas o tipos de aislamientos aplicados (10).

De acuerdo con el Sistema Nacional de Información de la Educación Superior – SNIES, para 2021 se registraron 2,448,271 estudiantes matriculados en IES públicas, presentando un incremento del 3.93% con respecto al año anterior; adicionalmente, en la población que se presenta en las IES se registraron 75,064 personas de carácter administrativo y 310,071 del sector docente (11). Como guía para estimar los consumos promedios de energía en edificios de uso educativo, el Código de Construcción Sostenible en Colombia presenta valores de teniendo en cuenta condiciones geográficas, climatológicas y de uso (12), también es posible encontrar referentes para la región en otros documentos como el proyecto CEELA que busca establecer recomendaciones y oportunidades que sean de relevancia para el propósito de fortalecer capacidades para la eficiencia energética en edificios en América Latina (13). Adicional a la demanda estándar de energía que se presentan sobre edificaciones universitarias de acuerdo con sus procesos, se tiene el uso de elementos externos tales como celulares, computadores portátiles, patinetas eléctricas entre otros, lo cual se podría ver reflejado en el aumento del consumo per cápita en la institución (14). Para el año 2021 en Colombia el consumo de energía eléctrica se aproximó a los 259 PJ con un aumento del 8% respecto a 2020 (15). Según el informe sobre la situación mundial de los edificios y la construcción en 2022: a nivel mundial, la intensidad energética de los edificios, que representa el total del consumo final de energía por metro cuadrado es de 150 kWh/m². Para la Agencia Internacional de la Energía (AIE, por sus siglas en inglés), si se quiere cumplir la meta a 2030 de emisiones netas cero, es necesario que esta intensidad disminuya en un 35% aproximadamente (16).

Todos los factores mencionados anteriormente, dependiendo del uso y tipo de actividades que se desarrollan en las edificaciones, juegan un papel importante en su eficiencia y comportamiento energéticos, razón por la cual es necesario considerar cada uno de estos factores en el momento de proponer acciones que ayuden a mejorar su desempeño energético mediante solución integral ajustada a sus necesidades.

Metodología

En esta sección, se precisa el procedimiento para realizar un mapeo temático sobre las diferentes metodologías para diagnosticar la eficiencia energética de edificaciones universitarias. Incluye la pregunta de revisión literaria, las fuentes de información, las cadenas y ecuaciones de búsqueda, los criterios de selección, y el análisis de la información, acorde con la metodología propuesta por Barbosa y Rodríguez para la revisión y análisis del estado del arte (17-18).

Pregunta de revisión literaria

El estudio comienza a partir del planteamiento de temas sobre metodologías usadas para diagnosticar la eficiencia energética en edificaciones, y en particular las de IES, con la intención de obtener información relevante que soportará la argumentación a la pregunta de revisión literaria y su respuesta. La conformación de los antecedentes mencionados en la Introducción conlleva entonces, a formular la siguiente pregunta de revisión literaria cuya respuesta corresponderá al desarrollo del análisis y discusión de los resultados encontrados: ¿cuáles son las metodologías usadas para diagnosticar la eficiencia energética en edificaciones, y específicamente en edificaciones de IES?

Fuentes de información

La búsqueda fue enfocada en las plataformas digitales para el acceso de documentos diversos publicadas en Internet, con el fin de hacer revisiones de fuentes bibliográficas con resultados publicados en revistas científicas, tesis de pregrado y posgrado, actualizaciones y publicaciones confiables de sitios web.

Cadenas y ecuaciones de búsqueda

En la Tabla 1, se presentan las ecuaciones de consulta utilizadas en los diferentes buscadores de referencias bibliográficas, las cuales se aplicaron tanto para información disponible en español como en inglés.

Tabla 1. Cadenas y ecuaciones de búsqueda aplicada para la consulta temática.

Ecuación de consulta en español	Ecuación de consulta en inglés
((“Eficiencia energética”) AND (“Edificaciones”) OR (Gestión Energética) OR (“Revisión”))	((“Energy efficiency”) AND (“buildings”) OR (Energy management) OR (“Review”))
((“Eficiencia energética”) AND (“Edificaciones Universitarias”) OR (Gestión Energética)	((“Energy efficiency”) AND (“college buildings”) OR (Energy management) OR (“Review”))

Criterios de selección

Una vez realizada las correspondientes búsquedas los documentos encontrados se seleccionaron, se les hizo una revisión exploratoria y analítica, identificando la clasificación temática a la cual corresponde, y se descartaron aquellos que se distanciaron del propósito de la revisión literaria; en consecuencia, los documentos obtenidos se filtraron de acuerdo con los siguientes criterios: a.- documentos duplicados, b.- documentos sin relación clara con la temática de revisión, c.- información poco confiable o procedente de fuente no reconocida, y d.- documentos derivados de una misma investigación, pero presentados en forma distinta.

Análisis de la información

La información se analiza a partir de los análisis bibliográfico y bibliométrico para las metodologías de diagnóstico de la eficiencia energética de edificaciones y en particular en edificaciones de IES, los cuales son presentados en la sección de resultados y discusión. En el análisis bibliográfico, se hace una descripción de las metodologías usadas en el diagnóstico de la eficiencia energética de las edificaciones, se analizan las variables allí involucradas, la pertinencia y aplicabilidad en edificaciones de IES. Con respecto al análisis bibliométrico, se evalúa la frecuencia de palabras claves de las ecuaciones de búsqueda



empleando el software VOSviewer (19) (versión 1.6.18, Leiden University, Leiden, The Netherlands), y el número mínimo de ocurrencias de palabras claves fue de cinco con el fin de obtener resultados significativos ante posible limitación de la información; en este análisis cada esfera simboliza una palabra clave, su tamaño representa el número de apariciones, el color indica la relación y categorización de las palabras y los enlaces señalan la relación de co-ocurrencia entre las palabras.

Resultados y discusión

Análisis bibliográfico para el uso de metodologías de diagnóstico del comportamiento energético en edificaciones de IES

El tiempo de ocupación por parte de las personas en las edificaciones, entre ellas colegios y universidades, es alrededor del 90%, lo cual tiene un impacto significativo en el uso de la electricidad, siendo el sector de la construcción que más utiliza este recurso en un 42% (20), y dada la tendencia en el crecimiento poblacional e industrial, aumentará paralelamente la demanda de electricidad y otras formas de energía usadas en las edificaciones (21-22).

Las formas de generación de energía actual, tales como hidroeléctricas, gas, carbón y petróleo, están ligadas a limitaciones asociadas a la disponibilidad de recursos, costos, espacio, aumento de la demanda, impactos ambientales, política y comportamientos socioculturales (23-24). Por esta razón surge la necesidad de estudiar el comportamiento energético de distintos tipos de edificaciones, su variación en el tiempo, a qué se asocian sus consumos y qué medidas se pueden adoptar para mejorar su desempeño energético, asegurando la disponibilidad del recurso desde una mirada sostenible que vaya en línea con objetivos de desarrollo mundiales y locales (25). El uso de la energía en universidades tiene una distribución particular debido a los cambios en las actividades que se presentan cada semestre, por lo cual se esperaría una dinámica menos estática que la presentada en empresas (26-27).

De acuerdo con la información encontrada se pudo evidenciar que la revisión de la eficiencia energética en edificaciones está determinada por metodologías que abordan diferentes variables dependiendo de la ubicación geográfica del edificio, las actividades realizadas en su interior, los equipos y demanda de energía teniendo en cuenta las horas de uso y regímenes estacionales; lo cual es concordante con las consideraciones para la evaluación de la eficiencia energética de edificios en general (28-32). A continuación, se presentan metodologías aplicadas a edificaciones universitarias que tuvieron una aproximación al comportamiento diferencial propio de las instituciones de educación superior.

En (33), Labiano y Medina, realizaron el "Diagnóstico energético de la Universidad Autónoma de Occidente" mediante un diagnóstico de primer grado, el cual consiste en la inspección visual del estado de conservación de las instalaciones, el análisis de los registros de operación y mantenimiento que rutinariamente se llevan en cada instalación; así como el análisis de la información estadística de consumos y gastos por concepto de energía eléctrica y combustibles. En este trabajo se analizó la calidad de la energía proveniente de las subestaciones, registrando eventos de voltaje, corriente y frecuencia, adicionalmente se analizaron registros históricos de las condiciones de operación de equipos, incluyendo los consumos específicos por día, mes y año. Una parte importante de este estudio se situó en el análisis de los diagramas unifilares y las distribuciones de cargas en los edificios, ya que esta tiene una influencia significativa en las pérdidas de energía o en su eficiencia dependiendo de la regulación del sistema. De acuerdo con lo encontrado, una de las conclusiones más importantes recae en el control de los consumos de manera interna, sectorizando las demandas y estableciendo parámetros independientes de operación, lo cual permitiría la pronta identificación de desviaciones y su posterior corrección, también recomiendan el estudio de la iluminación del campus de acuerdo con las especificaciones técnicas establecidas en el RETIEE, dado que se presenta como un factor crítico de consumo que está relacionado directamente con el comportamiento de la población y las actividades desarrolladas en la universidad.

Otro enfoque importante en el estudio energético en edificaciones está dado por la climatización y toma de datos de temperatura y pérdida de calor. En (34), Gil, evaluó el comportamiento térmico del edificio Vertex ubicado en Barcelona, para esto dividió el estudio realizado en cuatro fases: La primera, se concentró en el levantamiento de datos, recogiendo información del edificio que permitiera entender su funcionamiento, cuál era su estado actual y su consumo energético, teniendo en cuenta datos estáticos

y dinámicos; en la segunda se concentró en la caracterización del edificio mediante el análisis de los datos recogidos dividiéndolos por: sistemas de climatización, iluminación y otros sistemas continuos, funcionamiento del edificio, consumo de recursos y condiciones de confort; la tercera presentó el diagnóstico y las conclusiones obtenidas a partir de análisis realizado, esto permitió identificar los problemas del edificio de acuerdo con los sistemas seleccionados; en la cuarta fase, se plantearon acciones de mejora que permitirían solucionar los problemas identificados y conducir a un mejor desempeño energético. Luego del desarrollo de las cuatro fases se encontró entre los problemas principales el poco aprovechamiento de la iluminación natural, falta de información y conciencia de consumo. De la parte de climatización se evidenciaron pérdidas debido al uso de gas natural para este sistema y la falta de mantenimiento de éste, no existe un monitoreo de los consumos y temperaturas del edificio lo cual no permite identificar picos y las actividades asociadas a estos.

El desarrollo de modelos aplicados a la estimación, predicción y evolución del comportamiento del consumo de energía eléctrica en el sector residencial se ha potencializado debido al aumento de la demanda energética en edificaciones. Gago et al., (35), desarrollaron un modelo aplicado al consumo de energía eléctrica asociado a la iluminación en el sector vivienda residencial en Andalucía España, a partir de las directrices aprobadas por el gobierno en 2008, siguiendo una estrategia denominada "Estrategia Española de Cambio Climático y Energía Limpia", cuyo principal objetivo fue sustituir las bombillas incandescentes convencionales por bombillas de bajo consumo en el sector residencial, dado que el 31% del consumo de energía en edificaciones universitarias es consumido por la iluminación, considerar estos modelos puede ser relevante para mejorar la eficiencia energética de estas.

En este modelo se establecieron las relaciones entre los tipos de residencias, las fuentes de iluminación, la disponibilidad de luz natural, las actividades de los residentes y las horas de consumo para poder determinar el consumo total de energía asociado a la iluminación. De acuerdo con los resultados se encontró que la iluminación representa el 4 % aproximadamente del total de energía consumida y el tipo de residencia que tuvo un menor consumo fueron los bloques de edificios. Se concluye que la implementación de políticas que fomenten el uso de iluminación eficiente energéticamente (como el cambio en el tipo de luminarias) supondría una reducción de 0.61% del consumo total y una reducción del 18% en la factura de la luz por alumbrado público.

Una manera de identificar el comportamiento energético en universidades es mediante la mirada individual de un edificio modelo y de cómo la comprensión de su funcionamiento puede entregar respuestas para la gestión del conjunto completo, tal y como lo realizaron Valderrama et al., (36), en un campus universitario ubicado en la ciudad de Bordeaux, Francia. Para este estudio se inició con una recolección de datos e información sobre la utilización y funcionamiento de los recursos energéticos tales como producción de la cogeneración, de la caldera a leña, gas y electricidad. Se creó una base de datos con los consumos a partir de la facturación mensual y los datos meteorológicos de la ciudad y datos de usos del campus. Posteriormente, se realizó un análisis de la información recolectada, en donde los consumos facturados de la energía térmica y la energía eléctrica consumida fueron relacionados con variables meteorológicas seleccionadas: humedad relativa, velocidad del viento, temperatura media y la DJU (desviación entre la temperatura de un día dado y el umbral de temperatura preestablecida dependiendo del lugar), estas últimas dos variables se utilizaron además, para realizar un análisis de tendencia y división de los periodos de estudio y los datos de ocupación. Se seleccionaron tres periodos, uno con ocupación del 100% (estudiantes y administrativos), ocupación del 75% (disminución de estudiantes durante periodo de exámenes) y un 25% (periodo de vacaciones).

Para realizar una correlación se planteó la ecuación 1:

$$p(x,y) = \frac{Cov(x,y)}{\sigma_x\sigma_y}, \text{ donde: } -1 \leq p(x,y) \leq 1 \quad (\text{Ec. 1})$$

En donde $p(x,y)$ es el valor buscado, $\sigma_x\sigma_y$ son las variaciones estándar para los valores x, y; la covarianza es calculada como:



$$Cov(X, Y) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \mu_x) * (y_i - \mu_y) \quad (\text{Ec. 2})$$

En la ecuación 2, μ_x, μ_y representan la media de las variables x, y. A partir de esta ecuación se relaciona la base de datos de X, Y asociadas a las variables, independientes «x» (variables meteorológicas y de ocupación) y dependientes «y» (energía térmica producida por la caldera a leña y de gas y la energía de electricidad consumida y facturada, considerando la presencia estacional de la cogeneración). Con estas relaciones se realizó un análisis del sobreconsumo de electricidad en función de la temperatura media con el objetivo de reconocer las tendencias y conocer el rendimiento y perfil de comportamiento energético a nivel global. De acuerdo con todo el análisis se concluyó que los factores climáticos influyen directamente la variabilidad del consumo energético porque afectan el confort térmico que perciben los usuarios, otro factor importante es la ocupación, ya que determina las actividades y la demanda que puede presentarse en distintos periodos de tiempo, se hace un énfasis en especial sobre la singularidad de este sistema que depende de múltiples variables que deben ser analizadas y no es igual a un edificio residencial o una empresa. Finalmente, se recalca la importancia de involucrar a los estudiantes, al personal y en general a todos los usuarios del campus sobre la gestión energética y su papel en el desarrollo de políticas energéticas.

Para poder evaluar la efectividad de medidas de ahorro energético aplicadas en edificaciones se pueden identificar aquellos parámetros que influyen sobre la eficiencia energética. En este caso, Nord & Sjøthun (37), realizaron una recolección de datos para 41 edificios incluyendo tipo de edificio, características, costos de los proyectos de eficiencia energética y reacondicionamiento, los cuales serían comparados con los parámetros seleccionados de ahorro de energía y, por lo tanto, llegar a una conclusión sobre el éxito de la medida de eficiencia energética. Para esto se presentaron ecuaciones que permitieron comparar el uso de energía calculado con el uso de energía real después de la implementación de la eficiencia energética tal y como se muestra en la ecuación 3. A la diferencia entre el uso de energía calculado y el real se le denominó sesgo de ahorro de energía.

$$p = \left(\frac{E_{cal} - E_{real}}{E_{cal}} \right) \times 100 \quad (\text{Ec. 3})$$

Donde, E_{cal} es el uso de energía calculado (kWh); E_{real} es el uso de energía real después de la implementación de la medida de eficiencia energética (kWh). El uso de energía calculado fue basado en suposiciones prácticas de usos previos de la energía determinados por la ecuación 4.

$$E_{cal} = E_{antes} - E_{ahorro} \quad (\text{Ec. 4})$$

Donde, E_{ahorro} es estimado con base en proyectos previos, experiencias sobre posibles ahorros de energía cuando ciertas medidas son implementadas (kWh); E_{antes} (kWh) es la energía total anual consumida en el año base, el cual normalmente es el año anterior a la implementación de las medidas.

Para poder entender el factor de sesgo de comparación se simplificaron las siguientes expresiones:

- Si $E_{real} = E_{cal}$, $p=0$, la energía real ahorrada es igual a la energía ahorrada calculada.
- Si $E_{real} > E_{cal}$, $p < 0$, la energía real ahorrada es menor que la energía ahorrada calculada.
- Si $E_{real} < E_{cal}$, $p > 0$, la energía real ahorrada es mayor que la energía ahorrada calculada.

Según las expresiones anteriores, se dice que un parámetro tiene influencia positiva en el éxito de las medidas de eficiencia energética si $p > 0$.

De esta manera se podría estimar el éxito de las medidas implementadas para mejorar la eficiencia energética en edificaciones.

A nivel mundial han surgido métodos para evaluar la sustentabilidad de las edificaciones influyendo su desempeño energético, y Guillén et al., (38), muestran en la Tabla 2 algunos de los métodos de evaluación más representativos y los objetivos de cada uno en cuanto a la categoría de energía.

Tabla 2. Métodos de evaluación de la sustentabilidad en edificaciones

Método	País	Objetivo	Requerimiento
LEED	Estados Unidos	Mejorar la eficiencia energética en todo el edificio y reducir las emisiones de gases de efecto invernadero.	-Rendimiento energético. -Aislamiento -Infiltración de aire -Ventanas -Sistemas de distribución de calefacción y refrigeración -Equipos de calefacción y refrigeración de espacios -Agua caliente sanitaria -Iluminación -Electrodomésticos -Energía renovable -Manejo de refrigerante residencial -Iluminación exterior
BREEAM	Reino Unido	Evaluar el impacto medioambiental de las edificaciones y servir de referencia para una construcción más sustentable	-Tecnologías bajas en carbono -Ascensores -Electrodomésticos -Tasa de emisión de la vivienda -Envolvente térmica del edificio -Iluminación interna -Iluminación de zonas comunes -Espacio de secado -Energía no renovable (ENR) en materiales de construcción
VERDE	España	Evaluar la reducción de los impactos del edificio en cada etapa del ciclo de vida de la edificación.	-ENR en transporte de materiales -Consumo de ENR en fase de uso del edificio. -Demanda de energía eléctrica -Producción de energías -Emisión de sustancias foto oxidantes en procesos de combustión renovables en parcela.
CASBEE	Japón	Evaluar y calificar la actuación medioambiental de las edificaciones.	-Carga térmica en edificios -Utilización de energía natural -Eficiencia en sistemas de servicios del edificio. -Manejo eficiente (monitorización)
QUALITEL	Francia	Reducir el efecto invernadero y el consumo de energía convencional.	-Iluminación locales privados -Equipos -Estudio térmico -Niveles de rendimiento energético

Fuente: adaptado de (38).

De acuerdo con estos métodos, los autores mencionados proponen como requerimientos los siguientes: iluminación, electrodomésticos, envolvente térmica, energía renovable, climatización, ascensor, espacios de secado, emisiones, calentamiento de agua.

Una de las herramientas más utilizadas para tener una visión global del edificio de estudio es la auditoría energética. Esta permite identificar oportunidades de mejora para reducir su impacto ambiental y económico. En (39), Rojas, reporta la realización del diagnóstico energético del edificio principal del banco de la república utilizando como base los lineamientos de la auditoría y el diagnóstico energético proponiendo la siguiente metodología:

1. Determinación del plan de auditoría y determinación del alcance: descripción del edificio, información de consumos de energía eléctrica y de combustibles en el edificio. mediciones



generales de temperatura e iluminación, listas de comprobación y entrevistas a usuarios, hojas de cálculo para análisis de información.

2. Base diagnóstico: identificación de áreas de trabajo, identificación de equipos críticos, estándares de operación (actividades y rutinas), evaluación de equipos críticos.
3. Evaluación de desempeño arquitectónico: dirección predominante de los vientos, sensor de ocupación, baños eficientes, generación de energía por paneles solares, aislamiento de fachada, control de iluminación, variabilidad de montajes mobiliarios, sistemas de inclusión para personas discapacitadas.

A través de la medición de la huella de carbono, también se pudo evaluar la cantidad de gases de efecto invernadero generado por la energía consumida en instituciones. En (40), Farinango reporta un estudio donde se cuantifican la emisión de CO₂ por consumo de energía eléctrica en el edificio FICAYA de la universidad Técnica del Norte en Ecuador. Para esto se estimó la cantidad anual de consumo eléctrico al multiplicar el consumo semanal registrado por el número de semanas de los periodos de vacaciones, matriculas y clases, teniendo en cuenta el calendario académico de la universidad tal y como se muestra en la ecuación 5.

$$Ce = Csr - (\text{número de semanas}) \quad (\text{Ec. 5})$$

Donde:

Ce: Consumo de electricidad en sitio, kWh

Csr: Consumo de electricidad semanal registrado, kWh/semana

Para el cálculo de CO₂ se aplicó un factor de emisión (FE) determinado para el consumo de electricidad para Ecuador y para este caso se utilizó un factor combinado proveniente de hidroeléctricas y termoeléctricas que suministran el 97,45% de electricidad en el país (41). Para el cálculo de las emisiones de CO₂ por electricidad consumida se utilizó el método propuesto por el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC):

$$\text{Emision} = Ce * FE \quad (\text{Ec. 6})$$

Donde:

Emisión: Emisiones por consumo de electricidad, kg CO₂

Ce: Consumo de electricidad en el sitio, kWh

FE: Factor de emisión, kg CO₂/kWh

Como resultado de este estudio, se pudo observar el porcentaje de emisiones de CO₂ que representa un edificio frente a las emisiones totales de la universidad y como al incrementar la eficiencia energética del edificio se verá directamente afectada la huella de carbono puntual y global de la institución (40).

Existen diferentes conceptos bajo los cuales se puede realizar un análisis de eficiencia energética como es el caso de la exergía, y cuyo concepto corresponde al máximo trabajo útil que puede realizar un sistema respecto del ambiente (42-43). Analizando la exergía de un sistema, se observa la degradación de la energía dentro de un sistema por su pérdida de exergía, o a qué está asociada esa exergía. La energía ni se crea ni se destruye, sólo se transforma. La exergía, como habilidad para producir trabajo, se destruye, siendo la exergía destruida una medida de la degradación en la transformación de la energía. El análisis energético es una herramienta que permite determinar en forma cuantitativa el valor termodinámico de cualquier recurso energético pues analiza rigurosamente el desperdicio de energía o irreversibilidades en los procesos, establece pautas para el ahorro y uso eficiente de la energía. Se basa tanto en la primera como en la segunda ley de la Termodinámica, es decir además de un balance energético, en el incremento de la entropía o la degradación de la disponibilidad energética o exergía (44).

En el caso de las auditorías energéticas sirven como metodología fundamental para evaluar el desempeño energético de los edificios universitarios. El análisis realizado por Bosu et al., enfatizó la importancia de las auditorías energéticas para identificar oportunidades de ahorro de energía y optimizar la eficiencia general de los edificios (45). Esta metodología proporciona información valiosa sobre el estado actual del consumo de energía, destacando áreas de mejora e informando los procesos de toma de decisiones para renovaciones o modificaciones energéticas. Los softwares de modelación y simulación de comportamientos energéticos ofrecen un conjunto de herramientas para evaluar la eficiencia energética en edificaciones universitarias antes de que se lleve a cabo su construcción o renovación. La investigación de Pérez et al., demostró que la modelación energética permite a los ingenieros y arquitectos evaluar el impacto de diferentes opciones de diseño y optimizar su rendimiento energético (46). Esta metodología ayuda a tomar decisiones para minimizar el consumo de energía durante la fase operativa del edificio.

La adopción de sistemas de medición avanzados y tecnologías de automatización en edificaciones puede ser una herramienta importante para una evaluación precisa de la eficiencia energética. Según la investigación de Litardo et al., estos sistemas proporcionan datos en tiempo real sobre el consumo de energía, lo que permite a los administradores de las instalaciones controlar los patrones de uso, detectar anomalías y tomar medidas correctivas oportunas (47). La utilización de dichas tecnologías mejora la precisión de las evaluaciones de desempeño energético y aumenta el potencial de ahorro de energía.

Análisis bibliométrico para el uso de metodologías de diagnóstico del comportamiento en edificaciones de IES

El comportamiento energético en edificaciones está relacionado con la eficiencia energética y procesos de mejora orientados bajo tres ejes principales; recambio tecnológico, el cual representa el eje con mayor inversión en capital, medidas de gestión que suponen una inversión media y adopción de hábitos de uso responsable, donde se requiere menor inversión y están más orientados a la reducción del uso innecesario optimizando la relación entre energía consumida y la disponibilidad del recurso (48).

En el análisis de correlación de palabras claves realizado en VOSviewer utilizando todos los documentos consultados, se encontraron 6 grandes grupos, como se muestra en la Figura 1, en donde los ejes centrales son: 1.- eficiencia energética, 2.- edificaciones, 3.- ahorro de energía, 4.- desarrollo sostenible, 5.- fuentes de energía renovable, y 6.- consumo de energía. El primer grupo (verde); se enfoca en la eficiencia energética, relacionando conceptos de edificaciones inteligentes, manejo y utilización de la energía desde la planificación inteligente y el seguimiento a procesos; el segundo grupo relaciona las edificaciones (morado), desde las edificaciones universitarias, el comportamiento de la energía desde el reacondicionamiento y estudios de factibilidad para el cumplimiento normativo y mejora en el desempeño energético; el tercer grupo muestra el ahorro de la energía (azul) relacionando los conceptos de impacto ambiental, control de emisiones, cambio climático y control de emisiones; el cuarto grupo relaciona el desarrollo sostenible (amarillo) desde los conceptos de edificaciones sostenibles, educación, regulación ambiental, estudiantes, docentes y el diseño de estrategias bioclimáticas en la construcción; el quinto grupo está compuesto por las fuentes de energía renovable (rojo) enfocado al uso de tecnologías para incrementar la eficiencia de las edificaciones desde el uso de la energía solar, la transferencia de calor, sistemas de enfriamiento; finalmente, se aprecia un grupo más pequeño relacionado con consumo de energía (marrón) relacionado con el confort térmico, la calidad del aire, ventilación y la percepción de los usuarios.

las IES al reconocimiento de su impacto real dado por la presión sobre los recursos naturales debido a sus operaciones. La investigación reportada en (58), destacó la importancia del comportamiento de los ocupantes en el consumo de energía. Las campañas educativas, los programas de capacitación y la conservación de energía, pueden fomentar una cultura de conciencia energética y alentar a los ocupantes a adoptar prácticas de ahorro de energía, y contribuir así a la eficiencia energética general.

Algunas de las barreras encontradas en la implementación de estas metodologías, están relacionadas con la disponibilidad y recolección de información, frente a la determinación de los periodos de muestreo, dadas las variaciones que se pueden presentar a lo largo del año, donde se puede evidenciar una gran diferencia entre un periodo durante el primero y segundo semestre del año y los periodos de vacaciones. Estas variaciones pueden obedecer a cambios en las programaciones académicas, proyectos de investigación, población estudiantil y administrativa (59), por lo que al establecer una línea base sobre la eficiencia energética de una edificación universitaria se tiene que describir puntualmente bajo qué condiciones fue levantada y posteriormente realizar un seguimiento que permita su actualización al identificar estas variables significativas y evaluar el impacto de las acciones que se han implementado para mejorar esta eficiencia energética en el tiempo.

Referencias

- 1.- Salaet, S., & Roca, J. (2010). Agotamiento de los combustibles fósiles y emisiones de CO₂: algunos posibles escenarios futuros de emisiones. *Revista Galega de Economía*, 19(1), 1–19.
- 2.- Montt, G., Fraga, F., & Harsdorff, M. (2018). *The future of work in a changing natural environment: Climate change, degradation and sustainability*. International Labour Office – ILO, Geneva. Available in: https://www.ilo.org/wcmsp5/groups/public/---dgreports/---cabinet/documents/publication/wcms_644145.pdf
- 3.- Anne, P., & Velenfurt, P. (2021). Principles for a sustainable circular economy. *Sustainable Production and Consumption*, 27, 1437-1457.
- 4.- UPME. (2016). Plan de acción indicativo de eficiencia energética 2017-2022.
- 5.- Ministerio de Minas y Energía. (2022). Programa de Uso Racional y Eficiente de la Energía.
- 6.- Arango, M. (2019, March). Panorama energético de Colombia. Bancolombia. <https://www.bancolombia.com/empresas/capital-inteligente/especiales/especial-energia-2019/panomara-energetico-colombia>
- 7.- Nepal, R. & Pajja, N. (2019). Energy security, electricity, population and economic growth: The case of a developing South Asian resource-rich economy. *Energy Policy*, 132, 771-781. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2019.05.054>
- 8.- Muzayanah, I., Lean, H., Hartono, D., Indraswari, K., & Partama, R. (2022). Population density and energy consumption: A study in Indonesian provinces. *Heliyon*, 8 (9), e10634, <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e10634>
- 9.- IEA. (2020). *GlobalABC Regional Roadmap for Buildings and Construction in Latin America 2020-2050*. International Energy Agency – IEA. Available in: https://iea.blob.core.windows.net/assets/83b8b080-ec5e-46f1-a907-9e2f934e9094/GlobalABC_Regional_Roadmap_for_Buildings_and_Construction_in_Latin_America_2020-2050.pdf
- 10.- UNEP. (2020). Emisiones del sector de los edificios alcanzaron nivel récord en 2019: informe de la ONU.
- 11.- Ministerio de Educación. (2022). Matrícula en educación superior 2021. Julio 1, 2022. Disponible en: https://snies.mineducacion.gov.co/1778/articles-401926_recurso_1.pdf
- 12.- Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento. (2015). Código Técnico de Construcción Sostenible. Disponible en: <https://www.gob.pe/institucion/vivienda/noticias/508513-ministerio-de-vivienda-aprueba-nuevo-codigo->





tecnico-de-construccion-sostenible

- 13.- Proyecto CEELA. (2022). Estudio de casos normativos en los países del Proyecto CEELA. World Green Building Council. Disponible en: https://osc.dnp.gov.co/administrator/components/com_publicaciones/uploads/Estudio_de_Casos_Normativos_en_los_paises_del_Proyecto_CEELA.pdf
- 14.- Niño, D., & Ortiz, I. (2011). Evaluación del consumo de energía en función de las tendencias de ocupación de la sede central de la Universidad Industrial de Santander. Universidad Industrial de Santander.
- 15.- UPME. (2022). Resumen ejecutivo del Plan de Acción Indicativo PAI-PROURE 2021-2030. Disponible en:
https://www1.upme.gov.co/DemandayEficiencia/Documents/PROURE/Resumen_ejecutivo_PAI-PROURE_2022-2030_v2.pdf
- 16.- Global Alliance for Buildings and Construction. (2022). Informe sobre la situación mundial de los edificios y la construcción en 2022: Hacia un sector de los edificios y la construcción con cero emisiones, eficiente y resistente; (citado el 14 de julio 2023). (internet). Disponible en:
https://globalabc.org/sites/default/files/2022-11/SPANISH_Executive%20Summary_Buildings-GSR_0.pdf
- 17.- Universidad EAFIT. (2021). Búsqueda de Información en la Web. Programa de Formación en Competencias Informacionales 2021. Disponible en: https://repository.eafit.edu.co/bitstream/handle/10784/12970/Busqueda_de_informacion_en_la_Web_2021.pdf;jsessionid=0FF074F979AB0D873EC8E8A546A47DEB?sequence=2
- 18.- Barbosa, C., Barbosa, H., & Rodríguez, V. (2013). Revisión y análisis documental para estado del arte: una propuesta metodológica desde el contexto de la sistematización de experiencias educativa. *Investigación Bibliotecológica*, 27 (61), 83-105.
- 19.- van Eck, N., & Waltman, L. (2010). Software survey: VOSviewer, a computer program for bibliometric mapping. *Scientometrics*, 84 (2): 523-528. [Software survey: VOSviewer, a computer program for bibliometric mapping | SpringerLink](https://doi.org/10.1007/s11192-010-0149-4)
- 20.- United Nations Industrial Development Organization – UNIDO. (2018). Introduction and User Manual: Sustainable energy regulation and policymaking for Africa. Available in: https://www.unclearn.org/wp-content/uploads/library/manuals-all_0.pdf
- 21.- European Commission. (2020). Energy efficiency in buildings. European Commission – Department: Energy – In Focus. Available in:
https://commission.europa.eu/system/files/2020-03/in_focus_energy_efficiency_in_buildings_en.pdf
- 22.- Baines, E., & Blatchford, P. (2019). School break and lunch times and young people’s social lives: A follow-up national study. Final Report. Research funded by the Nuffield Foundation, May. Available in: <https://www.nuffieldfoundation.org/wp-content/uploads/2019/05/Final-report-School-break-and-lunch-times-and-young-peoples-lives-A-follow-up-national-study.pdf>
- 23.- Holechek, J., Geli, H., Sawalhah, M., & Valdez, R. (2022). A global assessment: Can renewable energy place fossil fuels by 2050? *Sustainability*, 14 (8), 4792. <https://doi.org/10.3390/su14084792>
- 24.- Osman, A., Chen, L., Yang, M., Msigwa, G., Farghali, M., Fawzi, S., Rooney, D.W., & Yap, P.S. (2022). Cost, environmental impact, and resilience of renewable energy under a changing climate: A review. *Environmental Chemistry Letters*, 21, 741-764. <https://doi.org/10.1007/s10311-022-01532-8>
- 25.- Di Foggia, G. (2018). Energy efficiency measures in buildings for achieving sustainable development goals. *Heliyon*, 4 (11), e00953. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2018.e00953>
- 26.- Torres, J. (2018). Metodología integrada de un sistema de gestión de energía para edificaciones [Tesis de Maestría]. Universidad Nacional de Colombia.

- 27.- Villamizar, M. (2016). Modelo de gestión y valoración de la eficiencia energética en proyectos de vivienda multifamiliar de costo medio en Colombia. [Tesis de Maestría]. Universidad Nacional de Colombia.
- 28.- Hernández, J. (2013). Metodología basada en ACV para la evaluación de sostenibilidad en edificios. [Tesis de Maestría]. Universitat Politècnica de Catalunya.
- 29.- González, R. (2007). Caracterización y evaluación energética de edificios existentes en base a medidas. Aplicación al sector residencial. [Tesis Doctoral]. Universidad de Sevilla.
- 30.- Gavilán, C. (2017). Análisis comparativo de la eficiencia energética en edificios existentes con diferentes herramientas de simulación energética. [Tesis Doctoral]. Universidad de Valladolid.
- 31.- Suárez, M. (2021). Gestión energética en edificios inteligentes usando optimización convexa. [Tesis de Maestría]. Universidad Tecnológica de Pereira.
- 32.- Instituto de la Construcción de Chile. (2012). Manual de Gestión de la Energía en Edificio Públicos. Proyecto Innova Chile – 09CN14-5706. Ministerio de Educación.
- 33.- Labiano, W, & Medina, G. (2006). Diagnóstico Energético de la Universidad Autónoma de Occidente [Pregrado]. Universidad Autónoma de Occidente.
- 34.- Gil, P. (2010). Evaluación del comportamiento energético edificio Vertex. [Tesis de Maestría]. Universitat Politècnica de Catalunya.
- 35.- Gago, E., García, J & Estrella, A. (2011). Development of an energy model for the residential sector: Electricity consumption in Andalusia, Spain. *Energy and Buildings*, 43(6), 1315–1321. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.01.016>
- 36.- Valderrama, C., Cohen, A., Lagièrre, P., & Puiggali, J. (2011). Análisis del comportamiento energético en un conjunto de edificios multifuncionales, Caso de estudio Campus Universitario. *Revista de La Construcción*, 10(2), 26-39. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-915X2011000200004>
- 37.- Nord, N., & Sjøthun, S. (2014). Success factors of energy efficiency measures in buildings in Norway. *Energy and Buildings*, 76, 476–487. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.03.010>
- 38.- Mena, V., Quesada, M., López, C., & Serrano, A. (2015). Energetic efficiency in residential buildings. *ESTOA*, 4(7), 63–72. <https://doi.org/10.18537/est.v004.n007.07>
- 39.- Rojas, D. (2016). Diagnóstico energético y propuesta de mejoramiento de la eficiencia energética de un edificio existente [Tesis Maestría]. Universidad Nacional de Colombia Sede Bogotá.
- 40.- Farinango, C. (2020). Evaluación del consumo energético y huella de carbono de edificio FICAYA de la Universidad Técnica del Norte. [Pregrado]. Universidad Técnica del Norte.
- 41.- ARCONEL (2018). Manual para la recopilación de la información del sector eléctrico a través del sistema SISDAT (Sistematización de datos del sector eléctrico). Recuperado de <https://www.regulacioneolica.gov.ec/wp-content/uploads/downloads/2019/06/Anexo-5.-Manual-SISDAT-Participantes.pdf>
- 42.- Kanoglu, M., Dincer, I., & Rosen, M. (2007). Understanding energy and exergy efficiencies for improved energy management in power plants. *Energy Policy*, 35, 3967 - 3978. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2007.01.015>
- 43.- Saidur, R., Ahamed, J. & Masjuki, H. (2010). Energy, exergy and economic analysis of industrial boilers. *Energy Policy*, 38, 2188 – 2197. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2009.11.087>
- 44.- Dufour, J. (2009, January). Exergía y Sostenibilidad. <https://www.Madrimasd.Org/Blogs/Energiasalternativas/2009/01/27/111829>.
- 45.- Bosu, I., Mahmoud, H., & Hassan, H. (2023). Energy audit, techno-economic, and environmental assessment of integrating solar technologies for energy management in a university residential building: A



- case study. *Applied Energy*, 341, 121141. <https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2023.121141>
- 46.- Pérez, L., Ortiz, J., & Pout, C. (2008). A review on buildings energy consumption information. *Energy and Buildings*, 40(3), 394–398. <https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2007.03.007>
- 47.- Litardo, J., Hidalgo, R., & Soriano, G. (2021). Energy Performance and Benchmarking for University Classrooms in Hot and Humid Climates. *Energies*, 14(21), 7013. <https://doi.org/10.3390/en14217013>
- 48.- Agencia Chilena de Eficiencia Energética – AChEE (2014). Guía de Apoyo al Desarrollo de Diagnósticos Energéticos para Instituciones de Educación Superior (IES). AChEE. Disponible en: <https://sustentabilidad.utem.cl/wp-content/uploads/2017/05/9.-GU%C3%8DA-DIAGN%C3%93STICOS-ENERG%C3%89TICOS.pdf>
- 49.- Omar, O. (2018). Intelligent building, definitios, factors and evaluation criteria of selection. *Alexandria Engineering Journal*, 57 (4), 2903-2910. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2018.07.004>
- 50.- Gamal, M., & Corvacho, H. (2022). Compliance with building energy code for the residential sector in Egyptian hot-arid climate: Potential impact, difficulties, and further improvements. *Sustainability*, 14 (7), 3396, <https://doi.org/10.3390/su14073936>
- 51.- Cheng, C. (2021). Adaptation of buildings for climate change: A literature review. [Thesis MSc.]. University of Gävle.
52. Schiano, R., Goncalves, J., & Vallejo, J. (2022). Pedagogy pro-desing and climate literacy: Teaching methods and research approaches for sustainable architecture. Compliance with building energy code for the residential sector in Egyptian hot-arid climate: Potential impact, difficulties, and further improvements. *Sustainability*, 14 (11), 6791. <https://doi.org/10.3390/su14116791>
- 53.- Zhang, S., Oclón, P., Klemes, J., Michorczyk, P., Pielichowska, K., & Pielicjowski, K. (2022). Renewable energy systems for building heating, cooling and electricity production with thermal energy storage. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 165, 112560. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112560>
- 54.- Jia, L., Han, J., Chen, Xi, Li, Q.Y., Lee, C.C., & Fung, Y.T. (2021). Interaction between thermal comfort, indoor air quality and ventilation energy consumption of educational buildings: A comprehensive review. *Buildings*, 11 (12), 591. <https://doi.org/10.3390/buildings11120591>
- 55.- Holguín, G., Llosas, Y., & Pérez III, J. (2021). Evaluación del sistema eléctrico de edificios de propósito educativo con respecto al uso racional y eficiente de la energía eléctrica. 6(5), 1169–1196. <https://doi.org/10.23857/pc.v6i5.2738>
- 56.- Arce, J. (2015). Metodología para implementar un sistema de gestión de energía en una instalación institucional, basado en la norma NTC-ISO 50001 Caso: Instituto Técnico Industrial Francisco José de Caldas [Pregrado]. Universidad Distrital Francisco José de Caldas.
- 57.- Dubois, M., & Blomsterberg, Å. (2011). Energy saving potential and strategies for electric lighting in future north european, low energy office buildings: A literature review. In *Energy and Buildings* (Vol. 43, Issue 10, pp. 2572–2582). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.07.001>
- 58.- Xu, P., Chan, E. H. W., & Qian, Q. K. (2011). Success factors of energy performance contracting (EPC) for sustainable building energy efficiency retrofit (BEER) of hotel buildings in China. *Energy Policy*, 39(11), 7389–7398. <https://doi.org/10.1016/J.ENPOL.2011.09.001>
- 59.- Carriço de Lima Montenegro Duarte, J., Ramos, B., Dias Barreto de Souza, A., de Lima Tostes, M., & Holanda, U. (2021). Building Information Modeling approach to optimize energy efficiency in educational buildings. *Journal of Building Engineering*, 43. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.102587>